UNIVERSITY OF TORONTO
3 1761 00175823 4

Handle with
EXTREME CARE
This volume is damaged or brittle
and *CANNOT* be repaired!
• photocopy *only if necessary*
• return to staff
• *do not* put in bookdrop
Gerstein Science Information Centre

# La Science Moderne

## et son état actuel

S. H
P58

*Bibliothèque de Philosophie scientifique.*

# LA
# Science Moderne
## et son état actuel

PAR

ÉMILE PICARD

Membre de l'Institut
Professeur à la Faculté des Sciences de Paris

83331
17/9/0

PARIS
ERNEST FLAMMARION, ÉDITEUR
26, RUE RACINE, 26

Droits de traduction et de reproduction réservés pour tous les pays, compris la Suède et la Norvège.

Q
125
P5

ELECTRONIC VERSION
AVAILABLE
NO. B9900051
UTL-265P

# LA SCIENCE MODERNE

## ET SON ÉTAT ACTUEL

---

## INTRODUCTION

### I

Mon but, dans ce petit volume, est de donner une idée d'ensemble sur l'état des sciences mathématiques, physiques et naturelles dans les premières années du vingtième siècle. On trouvera sans doute qu'il faut aujourd'hui beaucoup d'audace, pour avoir la prétention de tracer un tel tableau, et on n'aura pas tort. Mon excuse est que plusieurs personnes ont pensé qu'il y aurait quelque intérêt à reprendre et à développer le Rapport général sur les progrès récents des sciences, dont j'avais été chargé à l'occasion de l'Exposition Universelle de 1900. Une esquisse sommaire et, je l'espère, fidèle de l'état actuel des sciences, de leurs méthodes et de leurs tendances, précédée de quelques remarques historiques, fera peut-être mieux comprendre que des dissertations abstraites ce que cherchent les savants,

quelle idée on doit se faire de la science et ce qu'on peut lui demander.

J'éviterai en général toute discussion purement philosophique ; nous ferons, si l'on veut, de la philosophie des sciences, en étudiant leurs pénétrations et leurs influences réciproques, et en dégageant le véritable objet de leurs recherches, mais ce n'est pas là de la philosophie au sens où on l'entend souvent. Jamais un physicien ou un physiologiste, pendant une expérience, ne se pose de questions sur la réalité du monde extérieur ; il croit à la réalité, entendue au sens le plus vulgaire, des phénomènes qui se déroulent devant lui et dont il cherche à fixer les lois. A d'autres heures, il pourra rechercher dans quelle mesure le point de vue idéaliste est acceptable ; mais comme, pendant la recherche scientifique, une telle considération philosophique est absolument stérile, il n'en a aucun souci dans son laboratoire. Dans un autre ordre d'idées, le géomètre, quand il étudie les propriétés des lignes et des surfaces, ne se préoccupe pas de l'origine des notions géométriques ; s'il le fait à d'autres moments, ce sera, inconsciemment parfois, en partant d'un système philosophique bien arrêté, soit que, avec beaucoup de mathématiciens, il envisage un esprit humain, en quelque sorte extérieur aux choses, qu'il se représentera comme travaillant plus ou moins sur les données de l'expérience, soit que, en se plaçant au point de vue de l'évolutionisme, il ne

voie dans les problèmes d'origine, que des questions d'hérédité et d'adaptation. Je ne m'arrêterai donc qu'incidemment sur de tels problèmes, non pas que j'en méconnaisse l'intérêt; mais, par leur nature psychologique ou métaphysique, ils sortent du cadre bien délimité dans lequel je veux me renfermer.

Le domaine qui nous reste est assez considérable, et présentera assez de difficultés. En retraçant l'histoire des travaux récents, nous nous efforcerons d'indiquer les divers points de vue sous lesquels on peut envisager aujourd'hui la notion d'explication scientifique, et nous insisterons sur l'importance capitale des immenses constructions, que bâtissent les savants sous le nom de théories, constructions qui constituent une partie essentielle de la science, sans laquelle celle-ci se réduirait à des catalogues de faits. Nous aurons à dire le rôle qu'elles jouent, ce qu'on doit attendre d'elles, et aussi à discuter la valeur qu'il faut leur attribuer. Il en est des théories scientifiques comme des systèmes philosophiques, et les mêmes remarques se peuvent faire à leur sujet. Dans un article sur Hippolyte Taine, paru peu de temps après sa mort, M. Boutmy écrivait : « C'est la loi de l'esprit humain de changer périodiquement les points d'appui de ses constructions spéculatives. Toute philosophie, en tant que plan, est donc éphémère. Elle ne dure qu'aussi longtemps qu'elle sert, et la période où elle est de service est limitée. Un système a atteint sa plus haute valeur, d'abord,

quand il est à un moment donné le meilleur moyen d'ordonner l'ensemble des notions acquises, puis, quand il fournit un bon cadre de recherches, une méthode efficace de découvertes. Sa carrière est close, quand ces mérites faiblissent. Il se survit alors par des éléments détachés, dont plusieurs entrent dans l'acquis définitif de l'esprit humain, et sont parfois d'un prix immense ». Tout ce qui est dit ici des systèmes philosophiques peut se répéter des *théories scientifiques*. Dans tout ordre de sciences, le savant ne retient à un moment donné que les théories fécondes par leur puissance pour la coordination des faits acquis et pour la découverte de faits nouveaux.

Nous verrons aussi que les images, par lesquelles nous cherchons à nous représenter les phénomènes du monde extérieur, ne peuvent jamais être regardées, comme ayant un caractère définitif, aucune expérience ne pouvant établir la vérité d'une hypothèse prise isolément, et que, de plus, elles ne sont pas nécessairement uniques, ce qui a souvent permis à plusieurs théories de se développer simultanément. Que sont ici les éléments détachés, dont plusieurs entrent pour longtemps, il serait imprudent de dire pour toujours, dans l'acquis de la science? Ce sont les relations, jusque-là insoupçonnées, auxquelles ont conduit les théories, et que l'observation et l'expérience ont plus ou moins complètement mises ensuite en évidence. Telles sont, par

exemple, les relations entre la lumière et l'électricité dans la théorie de Maxwell, les lois du déplacement des équilibres chimiques dans la théorie de W. Gibbs ; telles encore, en biologie, les corrélations dans le développement des organismes, auxquelles ont conduit les théories de l'évolution.

On juge très faussement de la science, quand on oublie qu'elle est essentiellement mobile, et n'est formée que d'approximations successives, dont la convergence, dirait un mathématicien, reste un postulat. Mon illustre ami, M. Henri Poincaré, vient d'écrire dans cette collection un beau livre sur *la Valeur de la Science*. De même qu'on distingue en économie politique des valeurs diverses, je crois bien qu'on pourrait parler de diverses valeurs de la science. Pour beaucoup de chercheurs, la valeur de la science est surtout, si j'ose le dire, dans son incertitude et dans son instabilité ; ce qui les excite, c'est le désir de pousser plus loin l'approximation, en mettant en évidence des complexités jusque-là ignorées. Artistes, ils admirent certes l'harmonie, dont a parlé si éloquemment M. Poincaré ; mais leur plus grand bonheur est de la troubler. Une science qui serait terminée ne serait d'aucun intérêt pour ces savants. Ils avancent, avancent toujours, sans se faire d'illusions sur la relativité de nos connaissances, tout disposés à dire, avec le mathématicien allemand Jacobi, que le but unique de la science est l'honneur de l'esprit humain.

D'une autre nature est la valeur de la science, pour ceux qui veulent y trouver les énigmes de l'Univers. Ils ne s'arrêtent guère à la pensée que la science est à notre mesure, c'est-à-dire exprime les rapports avec nous du monde extérieur. Leur foi profonde peut quelquefois être une force ; mais leur conception absolue de la science tend à les enfermer dans des formules définitives, et quelques-uns prennent des allures dogmatiques, ajoutant une idole à d'autres idoles.

Il est encore un autre genre de valeur pour la science. Comme l'a dit Montaigne, « *c'est un grand ornement que la science* », mais il ajoute aussitôt « *et un outil de merveilleux service* ». Le plus grand nombre admire surtout dans la science le merveilleux spectacle des applications si variées, qui ont tant modifié depuis un siècle les conditions d'existence des peuples civilisés. C'est un genre de valeur aisément appréciable, mais on n'a qu'une vue très incomplète si on ne se rend compte des rapports qui existent entre ces brillantes manifestations de l'activité humaine et la science théorique et désintéressée. Depuis les temps lointains où les arpenteurs de l'antique Egypte mesuraient les champs de la vallée du Nil, préludant ainsi aux études géométriques que devait plus tard cultiver la Grèce, la dépendance a toujours été intime entre la science pure et la science appliquée. Ces influences réciproques ont agi, à travers les âges, dans l'un et l'autre sens, la

pratique conduisant ici à la spéculation, tandis que la théorie a été ailleurs l'origine de recherches pratiques. Au siècle dernier, l'influence des idées théoriques s'est largement développée ; elles apparaissent de plus en plus comme le germe fécond d'où sortent la plupart des progrès dans l'industrie, dans l'agriculture, dans la médecine. Les rêveurs scientifiques, qui semblent perdus dans leurs théories, sont à leur manière des hommes pratiques : l'application vient par surcroît. La source tarirait promptement, si un esprit exclusivement utilitaire venait à dominer dans nos sociétés trop préoccupées parfois de jouissances immédiates.

Avec ces divers points de vue est composée, à des degrés variables suivant la culture et la tournure d'esprit, l'opinion que nous nous faisons de la science. Le beau et l'utile s'y rejoignent et sont inséparables. Quelques-uns ont pu faire le procès de certaines utilités créées par la science, en lui reprochant d'augmenter nos désirs au détriment de notre bonheur ; sur un terrain aussi subjectif, la discussion est impossible. Quelque part de vérité que renferment ces vues pessimistes, personne ne nie le soulagement, que, de bien des côtés, les progrès des sciences ont apporté à l'humaine misère, et qu'ils apporteront dans l'avenir en apprenant à mieux utiliser les énergies naturelles et à en découvrir de nouvelles. On peut espérer qu'ils contribueront pour une large part à la solution des problèmes sociaux qui sont la

grande préoccupation de notre temps. Aussi, non seulement nous admirons la beauté de la science, mais nous croyons à sa bonté : c'est une pensée fortifiante pour ceux qui la cultivent.

## II

On verra d'abord, dans un rapide historique, comment les sciences de la nature ont tendu de plus en plus à prendre la forme mathématique, et quelle est la signification exacte de cette réduction. En étudiant la mécanique, nous aurons à discuter les nombreuses difficultés que présente aujourd'hui la notion d'explication mécanique. Il y a là un point d'une extrême importance, car c'est une idée essentielle, depuis Galilée et Descartes, que toutes les transformations du monde physique se font d'après les lois de la mécanique. On est conduit aujourd'hui à penser qu'il va falloir attribuer au mécanisme un sens plus étendu qu'on ne l'a fait pendant longtemps, et que, dans bien des cas, les approximations, dont on s'était contenté, sont devenues insuffisantes. Les moules anciens n'en seront pas pour cela brisés, mais élargis, et les lois générales devront sans doute être complétées par l'addition de nouveaux termes. La réduction du physique au mathématique prendra peut-être une forme plus compréhensive, mais on ne peut faire ici que des prévisions entre

lesquelles un choix serait prématuré. Perdant trop de vue le caractère approché de la vérité scientifique, on s'est ému des dangers que des découvertes récentes faisaient courir à des principes regardés comme au-dessus de toute atteinte. On se remet de cet émoi, et il y a lieu de présumer que les physiciens et les chimistes pourront conserver longtemps, en l'entendant bien, la formule cartésienne; nous verrons en effet combien la notion du mécanisme est malléable.

Les sciences naturelles se sont longtemps présentées, et quelques-unes de leurs parties se présentent encore avec un autre caractère que les sciences physiques et chimiques. Elles sont à un stade moins avancé, restant plus voisines de l'observation pure et simple, et la déduction y jouant un rôle moins important. Aussi ne doit-on pas s'étonner que, dans certaines théories zoologiques, la méthode soit autre que dans les théories physico-chimiques. Elle a souvent un caractère comparatif, et, en quelque sorte, historique; son maniement demande des habitudes d'esprit quelque peu différentes de celles habituelles aux savants adonnés aux sciences, qui sont entrées dans une période plus mathématique, et où le stade qualitatif, si je puis dire, est depuis longtemps dépassé. Nous devons penser que c'est là un état transitoire, car l'expérimentation s'introduit chaque jour en botanique et en zoologie, les questions morphologiques et l'expéri-

mentation physiologique pratiquée dans les conditions strictes des sciences physiques devenant de plus en plus connexes. En outre, comme nous le verrons, la biologie contemporaine tend à poser le postulat que les phénomènes vitaux se ramènent aux phénomènes physico-chimiques, et c'est là pour elle une vue féconde. Ce sont d'ailleurs les parties les moins élaborées de la physico-chimie qui seront appelées, si tant est qu'on puisse y réussir, à fournir en biologie les explications les plus importantes; la biologie est aujourd'hui une excitatrice pour la physico-chimie, remarquable exemple, entre tant d'autres, de l'influence qu'exercent les unes sur les autres des sciences regardées jadis comme très éloignées.

Cette influence et le mutuel appui que se prêtent les diverses parties de la science, on les retrouvera dans maintes parties de cet ouvrage. Des théories jusqu'ici isolées dans les sciences mathématiques se synthétisent dans les grandes disciplines dont la formation donne aux recherches des géomètres contemporains un vigoureux essor. La distinction entre la physique et la chimie devient chaque jour moins bien déterminée, et on parle constamment de chimie physique; nous venons de faire allusion à l'étroite union des études biologiques avec les recherches les plus délicates de la chimie moderne. On est effrayé, en songeant à la somme des connaissances que devra, dans un avenir prochain,

posséder le savant qui voudra mener à bonne fin une recherche scientifique; outre les connaissances générales à acquérir, les questions de technique seule, dans certaines parties des sciences expérimentales, demandent de longues années. Les savants de la Renaissance, qui pouvaient posséder toute la science de leur temps, font envie aux savants d'aujourd'hui qui, obligés de se cantonner dans quelques coins spéciaux s'ils veulent faire œuvre vraiment sérieuse, sont réduits à jeter seulement des regards superficiels sur l'ensemble des connaissances scientifiques.

Il semble que dorénavant, dans la vie scientifique comme dans la vie sociale, l'association s'imposera de plus en plus. Tel travail ne pourra être effectué que par la collaboration d'un mathématicien et d'un physicien, et tel autre demandera le concours d'un chimiste et d'un physiologiste. Sans doute, les hommes de génie qui orientent la science dans des voies entièrement nouvelles resteront toujours des chercheurs solitaires, mais ce sont là des cas exceptionnels. D'une manière générale, dans l'état actuel de nos connaissances, l'avenir est à la recherche collective et au groupement d'efforts judicieusement rassemblés qui risqueraient autrement de rester stériles. A cet égard les nations, où le travail scientifique est le mieux discipliné et où les disciples aiment à travailler sous l'impulsion d'un maître, ont une grande supériorité, le rendement des

recherches étant ainsi accru d'une manière considérable.

Dans un ordre d'idées analogues, nous avons vu se former récemment des entreprises, qui ne peuvent être menées à bien que par la collaboration d'un grand nombre de chercheurs. Telle est la carte photographique du ciel, à laquelle travaillent des observatoires de tous les pays. Nous citerons aussi l'Association géodésique internationale qui discute toutes les questions se rapportant à la forme du globe terrestre. Enfin, avec plus d'ampleur et un but moins étroitement limité, la réunion internationale des Académies, à laquelle ont adhéré les principales Sociétés savantes, commence à organiser des œuvres collectives. Sa première session à Paris, en 1901, marque peut-être une date dans l'histoire du travail scientifique.

# CHAPITRE I

## Sur le développement de l'analyse mathématique et ses rapports avec les autres sciences[1].

I. L'antiquité et le Moyen Age. — II. Le XVII^e et le XVIII^e siècle. — III. Le XIX^e siècle. — IV. L'Analyse et la Physique mathématique. — V. L'Analyse et la Mécanique. — VI. L'Analyse et la Géométrie. — VII. L'Analyse dans ses rapports avec la Chimie et la Biologie.

---

### I

#### L'ANTIQUITÉ ET LE MOYEN AGE

Nous commencerons par jeter un coup d'œil rapide sur le développement de l'Analyse et ses rapports avec quelques autres sciences. Quelques-unes des idées émises dans ce chapitre seront reprises et précisées dans la suite de cet ouvrage, mais il semble qu'il peut y avoir quelque intérêt à une vue historique d'ensemble sur les sciences

1. Ce chapitre résume une conférence faite au Congrès des Arts et Sciences de l'Exposition universelle de Saint-Louis (États-Unis), le 23 septembre 1904.

mathématiques dans leurs rapports avec les autres sciences. On verra ainsi par avance comment celles-ci tendent de plus en plus à prendre une forme mathématique, et quelle est la signification exacte de cette réduction.

On pourrait commencer par parler du concept même de nombre entier; mais ce sujet n'est pas seulement d'ordre logique, il est aussi d'ordre historique et psychologique et nous entraînerait à trop de discussions. Depuis que le concept de nombre a été approfondi, on y a trouvé de très grandes difficultés; ainsi, c'est un problème encore pendant que de savoir, entre les deux formes, le nombre cardinal et le nombre ordinal, sous lesquelles se présente l'idée de nombre, laquelle des deux est antérieure à l'autre, c'est-à-dire si l'idée de nombre proprement dit est antérieure à celle du rang, ou si c'est l'inverse. Il semble que les géomètres logiciens négligent trop dans ces questions la Psychologie et les enseignements que nous donnent les peuples non civilisés. Peut-être n'y a-t-il pas de réponse générale à la question posée, cette réponse variant suivant les races et suivant les mentalités. J'ai quelquefois pensé, à ce sujet, à la distinction entre les auditifs et les visuels, les auditifs se rattachant à la théorie ordinale et les visuels à la théorie cardinale. Mais je ne m'attarde pas sur ce terrain plein d'embûches. Je crains que notre école moderne de logiciens s'entende difficilement avec les ethnographes et les biologistes;

ceux-ci, dans les questions d'origine, sont toujours dominés par la thèse évolutionniste, et considèrent généralement la logique comme le résumé de l'expérience ancestrale. On a même reproché aux mathématiciens de poser en principe qu'il y a un esprit humain en quelque sorte extérieur aux choses, et qu'il a sa logique. Quoi qu'on en puisse penser, cette idée a été très utile, sinon indispensable, aux progrès des Sciences mathématiques, et, certainement, à supposer qu'elle ait évolué dans la suite des temps préhistoriques, cette logique de l'esprit humain était bien fixée du temps des plus vieilles écoles géométriques de la Grèce ; leurs travaux paraissent en avoir été le premier code, comme l'exprime l'histoire de Platon écrivant sur la porte de son école : « Que personne n'entre ici, s'il n'est géomètre ».

Longtemps avant que l'on eût tiré de l'arabe le mot bizarre d'*Algèbre*, qui, paraît-il, exprime l'opération par laquelle on ramenait les égalités à une certaine forme canonique, les Grecs avaient fait de l'algèbre sans le savoir; on ne peut même imaginer de relations plus étroites que celles qui liaient leur algèbre et leur géométrie, ou plutôt, on serait embarrassé de classer, s'il y avait lieu, leur algèbre géométrique, dans laquelle ils raisonnent, non sur les nombres, mais sur les grandeurs. Chez les Grecs aussi, nous trouvons une arithmétique géométrique, et une des phases les plus intéressantes de son

développement est le conflit qui, chez les Pythagoriciens, s'éleva à ce sujet, entre le nombre et la grandeur, à propos des irrationnelles. Si les Grecs cultivèrent l'étude abstraite des nombres, dénommée par eux *Arithmétique*, leur esprit spéculatif montra peu de goût pour le calcul pratique qu'ils appelaient la *Logistique*. Dans la haute antiquité, les Égyptiens et les Chaldéens, et plus tard les Indiens et les Arabes, poussèrent fort loin la science du calcul. Ils y avaient été conduits par les nécessités pratiques; la Logistique a précédé l'Arithmétique, comme l'Arpentage et la Géodésie ont ouvert la voie à la Géométrie; de même encore la Trigonométrie s'est développée sous l'influence des besoins croissants de l'Astronomie. L'histoire de la Science à ses débuts montre une relation étroite entre les Mathématiques pures et les Mathématiques appliquées : nous la retrouverons constamment dans les pages qui suivent.

Nous sommes restés jusqu'ici dans le domaine que le langage courant appelle *l'algèbre et l'arithmétique élémentaires*. En fait, dès qu'avait été reconnue l'incommensurabilité de certaines grandeurs, l'infini avait fait son apparition et, dès le temps des sophismes de Zénon sur l'impossibilité du mouvement, on dut se préoccuper de la sommation des progressions géométriques. Les procédés d'exhaustion que l'on trouve dans Eudoxe et dans Euclide appartiennent déjà au calcul intégral, et Archimède

calcule des intégrales définies. La Mécanique apparaît aussi dans son traité sur la quadrature de la parabole, car il trouve d'abord la surface du segment limité par un arc de parabole et sa corde en s'appuyant sur le théorème des moments; c'est le premier exemple des rapports entre la Mécanique et l'Analyse qui n'ont cessé de se développer par la suite. La méthode infinitésimale des géomètres grecs sur la mesure des volumes a soulevé des questions dont l'intérêt aujourd'hui même n'est pas épuisé. En géométrie plane, deux polygones équivalents sont égaux par addition ou par soustraction, c'est-à-dire peuvent être décomposés en triangles égaux ou regardés comme des différences de polygones susceptibles d'une telle décomposition. Il n'en est pas de même pour la géométrie de l'espace, et l'on sait depuis peu que la Stéréométrie ne peut pas, comme la Planimétrie, être faite sans recourir à des procédés d'exhaustion ou de limite. Ce coup d'œil jeté sur l'antiquité montre combien furent alors amalgamés l'Algèbre, l'Arithmétique, la Géométrie et les premiers essais de Calcul intégral et de Mécanique, au point qu'il est impossible d'en rappeler séparément l'histoire.

Au Moyen Age et à la Renaissance, l'Algèbre géométrique des anciens se sépare de la Géométrie. Peu à peu, l'Algèbre proprement dite arrive à l'autonomie, avec son symbolisme et ses notations de plus en plus perfectionnées; ainsi se crée cette

angue d'une admirable clarté, qui procura à la pensée une véritable économie et rendit possibles les progrès ultérieurs. C'est le moment aussi où des divisions distinctes s'organisent. La Trigonométrie qui, dans l'antiquité, n'avait été qu'une auxiliaire de l'Astronomie, se développe indépendamment; vers le même temps apparaît le logarithme et des éléments essentiels sont ainsi mis en évidence.

## II

### LE XVII^e ET LE XVIII^e SIÈCLE

Au XVII^e siècle, la Géométrie analytique de Descartes, distincte de ce que j'appelais tout à l'heure *l'Algèbre géométrique des Grecs* par les idées générales et systématiques qui sont à sa base, et la Dynamique naissante furent l'origine des plus grands progrès de l'Analyse. Quand Galilée, partant de l'hypothèse que la vitesse des corps pesants dans leur chute est proportionnelle au temps, en déduit la loi des espaces parcourus, pour la vérifier ensuite par l'expérience, il reprend, au point de vue du calcul, la voie où s'était jadis engagé Archimède, et qu'allaient suivre après lui Cavalieri, Fermat et d'autres encore jusqu'à Newton et Leibniz. Le calcul intégral des géomètres grecs renaît dans la cinématique du grand physicien de Florence. Quant au calcul des dérivées ou des différentielles,

il fut posé avec précision à propos du tracé des tangentes. En réalité, l'origine de la notion de dérivée est dans le sentiment confus de la mobilité des choses et de la rapidité plus ou moins grande avec laquelle les phénomènes s'accomplissent; c'est ce qu'expriment bien les dénominations de *fluentes* et de *fluxions*, dont se servait Newton, et qu'on croirait empruntées à l'antique Héraclite.

Les points de vue auxquels se placèrent les fondateurs de la science du mouvement, Galilée, Huyghens et Newton, eurent une influence énorme sur l'orientation de l'Analyse mathématique. Ce fut chez Galilée une intuition géniale de discerner que, dans les phénomènes naturels, les circonstances déterminantes du mouvement produisent des accélérations; elle devait conduire à poser le principe que la rapidité, avec laquelle change l'état dynamique d'un système, dépend d'une manière déterminée de son état statique seul. D'une manière plus générale, il fut postulé que les changements infiniment petits, de quelque nature qu'ils soient, qui surviennent dans un système de corps, dépendent uniquement de l'état *actuel* de celui-ci. Dans quelle mesure les exceptions sont-elles apparentes ou réelles? c'est une question qui ne fut soulevée que plus tard et sur laquelle nous reviendrons quand nous parlerons de l'*explication mécanique* des phénomènes naturels. Des principes énoncés se dégage un point capital pour l'analyste : les phénomènes sont régis

par des équations différentielles, c'est-à-dire par des relations entre les fonctions inconnues et leurs dérivées. On peut les former, quand l'observation et l'expérience ont fait connaître pour chaque catégorie de phénomènes certaines lois physiques. L'intégration de ces équations pour certaines données correspondant à un moment déterminé, permet de suivre les phénomènes quand le temps varie, et par suite de prévenir l'avenir, souvent sous forme numérique. On comprend les espérances illimitées que durent faire concevoir ces résultats. Comme le dit Bertrand dans la préface de son *Traité de calcul différentiel et intégral*, « les premiers succès furent d'abord tels que l'on put supposer toutes les difficultés de la Science surmontées à l'avance, et croire que les géomètres, sans être distraits plus longtemps par l'élaboration des Mathématiques pures, pourraient tourner exclusivement leurs méditations vers l'étude des lois naturelles ». C'était admettre gratuitement que les problèmes d'Analyse, auxquels on était ramené, ne présenteraient pas de très graves difficultés. Mais, malgré les désillusions que devait apporter l'avenir, il restait ce point capital que les problèmes avaient pris une forme précise, et qu'une classification pouvait s'établir dans les difficultés à surmonter. Il y eut donc un progrès immense, un des plus grands qu'ait jamais fait l'esprit humain, et la voie où allaient s'engager la mécanique et la physique mathématique, était ouverte.

J'ai devancé quelque peu les temps, en présentant les choses sous une forme aussi analytique. La Géométrie fut mêlée à tous ces progrès. Huyghens, par exemple, suivit toujours de préférence les anciens, et son *Horologium oscillatorium* roule à la fois sur la Géométrie infinitésimale et sur la Mécanique; de même, dans le livre des *Principes* de Newton, les méthodes suivies sont synthétiques. C'est surtout avec Leibniz que la Science s'engage dans les voies qui devaient conduire à ce que nous appelons l'*Analyse mathématique;* c'est lui qui, pour la première fois, dans les dernières années du XVII^e siècle, prononce le mot de *fonction*. Par son esprit systématique, par les nombreux problèmes qu'il traita ainsi que ses disciples, Jacques et Jean Bernoulli, il montra d'nne manière définitive la puissance des doctrines à l'édification desquelles avaient successivement contribué une longue suite de penseurs depuis les temps lointains d'Eudoxe et d'Archimède.

Le XVIII^e siècle montra l'extrême fécondité des nouvelles méthodes. Ce fut un temps curieux que celui de ces duels mathématiques, où les géomètres se lançaient des défis, luttes qui n'étaient pas toujours sans aigreurs, quand Leibniziens et Newtoniens se rencontraient dans la lice. Au point de vue purement analytique, la classification et l'étude des fonctions simples sont particulièrement intéressantes; l'idée de fonction, sur laquelle repose l'Analyse, se

développe ainsi peu à peu. Les Ouvrages célèbres d'Euler tiennent alors une place considérable. Toutefois, les nombreux problèmes qui se posent devant les mathématiciens ne leur laissent guère le temps de scruter les principes; les bases mêmes de la doctrine s'élucident lentement, et le mot attribué à d'Alembert « *allez en avant, et la foi vous viendra* » est bien caractéristique de cette époque. De tous les problèmes soulevés à la fin du XVII^e^ siècle ou pendant la première moitié du XVIII^e^, il me suffira de rappeler ces problèmes d'isopérimètres qui allaient donner naissance au calcul des variations, problème dont le type le plus simple est offert par la recherche de la ligne la plus courte entre deux points d'une surface.

Arrêtons-nous davantage sur la pénétration plus intime encore entre l'Analyse et la Mécanique, lorsque, après la période d'induction du premier âge de la dynamique, on en arriva à la période déductive où l'on s'efforça de donner aux principes une forme définitive. Le développement mathématique et formel joua alors le rôle essentiel, et le langage analytique fut indispensable à la plus grande extension des principes. Il y a des moments dans l'histoire des sciences, et peut-être des sociétés, où l'esprit est soutenu et porté en avant par les mots et les symboles qu'il a créés, et où les généralisations se présentent avec le moindre effort. Tel fut particulièrement le rôle de l'Analyse dans le développement

formel de la Mécanique. Qu'on me permette ici une remarque. On répète souvent *qu'il n'y a, dans une équation, que ce qu'on y a mis.* Il est facile de répondre d'abord que la forme nouvelle, sous laquelle on retrouve les choses, constitue souvent à elle seule une importante découverte. Mais il y a quelquefois plus : l'analyse, par le simple jeu de ses symboles, peut suggérer des généralisations dépassant de beaucoup le cadre primitif. Il en fut ainsi avec le principe des vitesses virtuelles dont l'idée première vint des mécanismes les plus simples. La forme analytique, qui le traduisait, suggéra des extensions qui menèrent loin du point de départ. En un sens même, il n'est pas juste de dire que l'Analyse n'a rien créé, puisque ces conceptions plus générales sont son œuvre. Un autre exemple nous est encore fourni par le système des équations de Lagrange ; ici, des transformations de calcul ont donné le type des équations différentielles auxquelles plusieurs tendent à ramener aujourd'hui la notion d'explication mécanique. Il y a, dans la Science, peu d'exemples comparables à celui-là, de l'importance de la forme d'une relation analytique et de la puissance de généralisation dont elle peut être capable. Dans chaque cas, d'ailleurs, les généralisations suggérées doivent être précisées par un appel à l'observation et à l'expérience, et ensuite, c'est encore le calcul qui cherchera les conséquences lointaines à soumettre aux mêmes contrôles.

Sous l'impulsion des problèmes que posent la Géométrie, la Mécanique et la Physique, nous voyons se développer ou prendre naissance presque toutes les grandes divisions de l'Analyse. On avait d'abord rencontré des équations à une seule variable indépendante. Bientôt les équations aux dérivées partielles apparaissent avec le problème des cordes vibrantes, la Mécanique des fluides et la Géométrie infinitésimale des surfaces. C'était tout un monde analytique nouveau ; l'origine même des problèmes traités fut un secours qui permit de ne pas s'égarer dès les premiers pas et, entre les mains de Monge, la Géométrie rendit d'utiles services aux théories naissantes.

Mais, de toutes les applications de l'Analyse, aucune alors n'eut plus d'éclat que les problèmes de Mécanique céleste posés par la connaissance des lois de la gravitation et auxquels attachèrent leurs noms les plus grands géomètres. La théorie n'eut jamais de plus beau triomphe ; peut-être même pourrait-on ajouter qu'il fut trop complet, car c'est à ce moment surtout que l'on conçut pour la Philosophie naturelle les espérances au moins prématurées dont je parlais plus haut.

Dans toute cette période, surtout dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, ce qui nous frappe d'admiration et nous procure aussi quelque confusion, c'est l'extrême importance des applications réalisées, alors que la théorie pure paraît encore si mal assurée.

On le voit, quand certaines questions sont soulevées, comme le degré d'arbitraire dans la solution trouvée pour le problème des cordes vibrantes, qui donne lieu entre les plus grands géomètres à une interminable et peu concluante discussion. Lagrange sentait ces insuffisances, quand il publiait sa théorie des fonctions analytiques, où il s'efforce de donner une base précise à l'Analyse. On ne saurait trop admirer le merveilleux pressentiment qu'il eut du rôle que devaient jouer les fonctions que nous appelons, comme lui, *analytiques*, c'est-à-dire des fonctions représentées par une série de puissances, ou série de Taylor ; mais nous restons étonnés, on peut l'avouer, devant la démonstration singulière qu'il croit avoir donnée de la possibilité du développement d'une fonction en série de Taylor. Les exigences, dans les questions d'Analyse pure, étaient moindres à cette époque. Se fiant à l'intuition, on se contentait de certains vraisemblances et l'on s'entendait implicitement sur certaines hypothèses qu'il paraissait inutile de formuler explicitement ; au fond, on avait confiance dans la solidité des idées qui s'étaient tant de fois montrées fécondes, ce qui est à peu près le mot de d'Alembert. Le besoin de rigueur en Mathématiques a eu ses approximations successives et, à cet égard, ces sciences n'ont pas le caractère absolu que tant de personnes leur attribuent.

## III

### LE XIXe SIÈCLE

Nous voici arrivés aux premières années du XIXe siècle. Comme nous l'avons expliqué, la grande majorité des recherches analytiques eut, au XVIIIe siècle, pour occasion un problème de Géométrie et surtout de Mécanique et de Physique et nous n'avons guère trouvé les préoccupations logiques et esthétiques qui vont donner une physionomie si différente à tant de travaux mathématiques, surtout dans les deux derniers tiers du XIXe siècle. N'anticipons pas cependant, et, après les exemples si nombreux de l'influence de la Mécanique et de la Physique sur le développement de l'Analyse, nous en rencontrons encore un nouveau, et des plus mémorables, dans la théorie de la chaleur de Fourier.

Le grand physicien commence par former les équations aux dérivées partielles régissant la température, en partant de la loi de Newton relative au refroidissement et de la notion de capacité calorifique. C'est là l'équation générale du phénomène, mais il faut maintenant des conditions aux limites permettant de déterminer une solution. Pour Fourier, les conditions sont suggérées par le problème physique, et les méthodes qu'il a suivies ont servi de modèles aux géomètres physiciens de la première

moitié du siècle dernier. Il obtint ainsi, par exemple, les premiers types de développements plus généraux que les développements trigonométriques, comme dans le problème du refroidissement d'une sphère, où il applique sa théorie au globe terrestre et recherche la loi qui régit les variations de température dans le sol, en s'efforçant d'aller jusqu'aux applications numériques. Devant ces beaux résultats, qui faisaient tenir en une seule formule tous les phénomènes de conductibilité calorifique, on comprend l'enthousiasme de Fourier qui éclate à chaque ligne de son discours préliminaire. Parlant de l'Analyse mathématique : « *Il ne peut y avoir, dit-il, de langage plus universel et plus simple, plus exempt d'erreurs et d'obscurités, c'est-à-dire plus digne d'exprimer les rapports invariables des êtres naturels. Considérée sous ce point de vue, elle est aussi étendue que la nature elle-même ; elle définit tous les rapports sensibles, mesure les temps, les espaces, les forces, les températures ; cette science difficile se forme avec lenteur, mais elle conserve tous les principes qu'elle a une fois acquis. Elle s'accroît et s'affermit sans cesse, au milieu de tant d'erreurs de l'esprit humain.* » L'éloge ne laisse rien à désirer ; on y voit cependant percer la tendance qui fait uniquement de l'Analyse l'auxiliaire, si incomparable qu'il soit, des sciences de la nature, tendance conforme, comme nous l'avons vu, au développement de la science pendant les deux siècles précédents ; mais nous arrivons

précisément à une époque où apparaissent des tendances nouvelles. Poisson ayant, dans un rapport académique, rappelé le reproche fait par Fourier aux deux grands géomètres Abel et Jacobi de ne pas s'être occupés de préférence du mouvement de la chaleur, Jacobi écrit à Legendre : « Il est vrai que M. Fourier avait l'opinion que le but principal des mathématiques était l'utilité publique et l'explication des phénomènes naturels ; mais un philosophe comme lui aurait dû savoir que *le but unique de la science, c'est l'honneur de l'esprit humain*, et que, sous ce titre, une question de nombre vaut autant qu'une question du système du monde. » C'était sans doute aussi l'opinion de Gauss, le grand mathématicien et physicien de Göttingen, qui appelait les mathématiques la reine des sciences et l'arithmétique la reine des mathématiques. Il serait puéril d'opposer l'une à l'autre ces deux tendances ; l'harmonie des sciences mathématiques est dans leur synthèse.

Le moment devait arriver où l'on sentirait le besoin d'inspecter les bases de l'édifice et de faire l'inventaire des richesses accumulées, en apportant plus d'esprit critique. La pensée mathématique allait prendre plus de force en se repliant sur elle-même ; les problèmes s'épuisent pour un temps, et il n'est pas bon que tous les chercheurs restent dans la même voie. D'ailleurs, des difficultés et des paradoxes restés inexpliqués rendaient nécessaires les

progrès de la théorie pure. La voie où celle-ci devait se mouvoir était tracée dans ses grandes lignes, et elle pouvait y marcher avec indépendance sans perdre nécessairement contact avec les problèmes que posaient la Géométrie, la Mécanique et la Physique. On allait attacher en même temps plus d'intérêt au côté philosophique et artistique des mathématiques, confiant dans une sorte d'harmonie préétablie entre nos satisfactions logiques et esthétiques et les nécessités des applications futures.

Sans insister, rappelons seulement quelques points dans l'histoire de la revision des principes dont Gauss, Cauchy et aussi Abel furent les ouvriers de la première heure. Des définitions précises sur les fonctions continues et leurs propriétés les plus immédiates, des règles simples sur la convergence des séries furent formulées et bientôt on établissait, sous des conditions très générales, la possibilité des développements trigonométriques, légitimant ainsi la hardiesse de Fourier. Certaines intuitions géométriques relatives aux aires, aux arcs firent place à des démonstrations rigoureuses. Les géomètres du dix-huitième siècle avaient nécessairement cherché à se rendre compte du degré de généralité de la solution des équations différentielles ordinaires. L'assimilation avec des équations aux différences conduisait facilement au résultat, mais il ne fallait pas serrer de bien près la démonstration ainsi conduite. Lagrange, dans ses *Leçons sur le calcul des fonctions*,

avait apporté plus de précision et, partant de la série de Taylor, il vit que l'équation d'ordre $m$ laisse indéterminées la fonction et ses $m - 1$ premières dérivées pour la valeur initiale de la variable ; nous ne nous étonnons pas que Lagrange ne se soit pas posé la question de convergence. En vingt ou trente ans, les exigences dans la rigueur des preuves s'étaient accrues. Les deux modes précédents de démonstrations sont, en fait, susceptibles de toute la précision nécessaire. Mais, pour le second, il fallait que la théorie se développât dans une voie nouvelle. Jusqu'ici les fonctions et les variables étaient restées *réelles*. La considération des variables *complexes*, dites aussi quelquefois *imaginaires*, vint étendre le champ de l'Analyse. Les fonctions d'une variable complexe à dérivée unique sont nécessairement développables en série de Taylor ; on retombe ainsi sur le mode de développement dont Lagrange avait compris l'intérêt, mais dont l'importance ne pouvait être mise pleinement en évidence si l'on se bornait aux variables réelles. Ces développements doivent aussi le plus grand rôle qu'ils n'ont cessé de jouer à la facilité avec laquelle on peut les manier et à leur commodité dans les calculs. Les théorèmes généraux de la théorie des fonctions *analytiques* ont permis de répondre avec précision à des questions restées jusque-là indécises, comme le degré de généralité des intégrales des équations différentielles à une ou plusieurs variables, questions de la

plus haute importance d'après ce que j'ai dit du rôle des équations différentielles dans les applications de l'Analyse.

## IV

### L'ANALYSE ET LA PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

Sans nous astreindre à l'ordre historique, reprenons le développement de la Physique mathématique au siècle dernier, en tant qu'il intéresse l'Analyse. Les problèmes d'équilibre calorifique, cas particulier du problème de Fourier, conduisent à l'équation déjà rencontrée par Laplace dans l'étude de l'attraction. Il y a peu d'équations ayant fait l'objet d'autant de travaux que cette équation célèbre. Les conditions aux limites peuvent être de formes diverses. Le cas le plus simple est celui de l'équilibre calorifique d'un corps dont on maintient les éléments de la surface à des températures données; au point de vue physique, il peut être regardé comme évident que la température, continue à l'intérieur puisqu'il n'y a pas de source de chaleur, se trouve déterminée quand elle est donnée à la surface. Un cas plus général est celui où, l'état restant permanent, il y aurait rayonnement vers le dehors avec un pouvoir émissif variant sur la surface avec une loi donnée; en particulier, la température peut être donnée sur une portion, tandis qu'il y a

rayonnement sur l'autre portion. Ces questions, qui ne sont pas encore résolues dans leur plus grande généralité, ont grandement contribué à l'orientation de la théorie des équations aux dérivées partielles. Elles ont appelé l'attention sur des types de déterminations des intégrales qui ne se seraient pas présentés en restant à un point de vue purement abstrait.

L'équation de Laplace se rencontre encore en Hydrodynamique et dans l'étude de l'attraction en raison inverse du carré de la distance. Cette dernière théorie a conduit à mettre en évidence les éléments les plus essentiels comme les potentiels de simples couches et de doubles couches, si importants en électricité. Les problèmes fondamentaux de l'électricité statique rentrent nécessairement dans le même ordre d'idées et c'est certes un beau triomphe pour la théorie que la découverte faite par Georges Green du célèbre théorème sur les phénomènes électriques à l'intérieur d'un conducteur renfermant une cavité, d'après lequel aucun phénomène électrique extérieur ne se fait sentir dans cette cavité; Faraday retrouva plus tard expérimentalement ce résultat, sans avoir connaissance du Mémoire de Green.

Tout ce magnifique ensemble est resté le type de ces théories déjà anciennes de Physique mathématique, qui nous semblent presque avoir atteint la perfection et qui ont exercé et exercent encore une si heureuse influence sur les progrès de l'Analyse

pure, en lui suggérant les plus beaux problèmes. La théorie des fonctions nous offrira encore un rapprochement intéressant. Les transformations analytiques mises en jeu n'y sont pas distinctes de celles que nous avons rencontrées dans le mouvement permanent de la chaleur. Certains problèmes fondamentaux de la théorie des fonctions d'une variable complexe ont pu perdre alors leur énoncé abstrait pour prendre une forme physique, comme celui de la distribution de la température sur une surface fermée de connexion quelconque et ne rayonnant pas, en équilibre calorifique avec deux sources de chaleur qui correspondent nécessairement à des flux égaux et de signes contraires. Ces rapprochements entre des questions d'origines si diverses donnent au mathématicien l'assurance qu'il ne s'égare pas au milieu de ses symboles. Rien ne peut mieux montrer que ceux-ci ne sont pas de simples jeux de l'esprit.

Les exemples qui précèdent, où nous n'avons guère envisagé que les équations de la chaleur et de l'attraction, montrent que l'influence des théories physiques ne s'est pas exercée seulement sur la nature générale des problèmes à résoudre, mais même dans le détail des transformations analytiques. La théorie de l'électricité dynamique et celle du magnétisme, avec Ampère et Gauss, ont été aussi l'origine d'importants progrès; l'étude des intégrales curvilignes et celles des intégrales de surfaces ont pris là tous leurs développements. Les équations

de la propagation de l'électricité, auxquelles se rattachent les noms de Ohm et de Kirchhoff, tout en présentant une grande analogie avec celles de la chaleur, offrent souvent des conditions aux limites un peu différentes. On sait tout ce que la télégraphie par câbles doit à la discussion approfondie des intégrales d'une équation de Fourier transportée en électricité; c'est de là que lord Kelvin a tiré les règles essentielles relatives à la télégraphie transatlantique.

Les équations de la théorie de l'élasticité, celles de Maxwell en électromagnétisme sont venues offrir des problèmes analogues à ceux rappelés plus haut, mais dans des conditions plus variées encore. Il s'y rencontre bien des difficultés insurmontées, mais que de beaux résultats on doit à l'étude de cas particuliers. Les premières ont conduit à la théorie élastique, les secondes à la théorie électromagnétique de la lumière.

Notons encore, comme intéressant à la fois l'Analyse et la Physique, les différences profondes que peut présenter la propagation suivant les phénomènes étudiés. Avec des équations comme celles du son, on a une propagation par ondes; avec l'équation de la chaleur, toute variation se fait sentir instantanément à toute distance, mais très peu à très grande distance, et l'on ne peut parler alors de vitesse de propagation. Dans d'autres cas, dont l'équation de Kirchhoff relative à la propagation de l'électricité avec induction et capacité offre le type

le plus simple, il y a un front d'onde avec une vitesse déterminée mais avec un résidu à l'arrière qui ne s'éteint pas, et cette remarque est capitale pour la discussion des expériences relatives à la propagation de l'électricité. Ces circonstances diverses, si intéressantes pour le physicien, ont été en réalité mises en évidence par l'étude analytique des intégrales; celle-ci soulève des questions où interviennent les notions les plus profondes de l'Analyse moderne, qui se trouvent ainsi, encore une fois, liées aux problèmes les plus importants que posent les théories électriques.

## V

### L'ANALYSE ET LA MÉCANIQUE

J'ai été conduit à m'étendre surtout sur les équations aux dérivées partielles. Des exemples choisis dans la Mécanique rationnelle et dans la Mécanique céleste montreraient aisément le rôle que jouent les équations différentielles ordinaires dans les progrès de ces sciences, dont l'histoire, nous l'avons vu, a été si étroitement liée à celle de l'Analyse. Quand on eut perdu l'espérance d'intégrer avec des fonctions simples, on s'est efforcé de trouver des développements permettant de suivre un phénomène le plus longtemps possible, ou d'obtenir au moins des renseignements sur son allure qualitative. Pour la

pratique, il y a dans les méthodes d'approximations une partie extrêmement importante des Mathématiques, et c'est ainsi que les parties les plus élevées de l'Arithmétique théorique se trouvent en relation avec les sciences appliquées. Quant aux séries, les démonstrations mêmes d'existence des intégrales en fournissent tout d'abord; ainsi, on peut obtenir des développements convergents tant que les intégrales et les coefficients différentiels restent continus. Quand quelque circonstance permet de prévoir qu'il en est toujours ainsi, les développements obtenus sont toujours convergents. Dans le problème des $n$ corps, on obtient de cette manière des développements valables tant qu'il n'y a pas de chocs. Si les corps, au lieu de s'attirer, se repoussaient, cette circonstance ne serait pas à craindre, ce qui rendrait la Mécanique céleste bien facile; malheureusement, comme le disait un jour Fresnel à Laplace, « *la nature ne se soucie pas des difficultés analytiques* » et les corps célestes s'attirent au lieu de se repousser. On serait même tenté parfois d'aller plus loin que le grand physicien, et de dire que la nature a semé les difficultés sur les chemins des analystes. Ainsi, pour prendre un autre exemple, on peut généralement décider, étant donné un système d'équations différentielles du premier ordre, si la solution générale est stable ou non autour d'un point, et trouver des développements en séries valables pour les solutions stables; il faut seulement que certaines

inégalités soient vérifiées. Mais applique-t-on ces résultats aux équations de la Dynamique pour discuter la stabilité; on se trouve justement dans le cas particulier défavorable. En général, même ici, il n'est pas possible de se prononcer sur la stabilité; dans le cas d'une fonction des forces ayant un maximum, c'est seulement un raisonnement classique mais indirect qui établit la stabilité, laquelle ne peut se déduire d'aucun développement valable pour toute valeur du temps.

Ne regrettons pas ces difficultés; elles seront la source de progrès futurs. Telles aussi les difficultés que nous offrent encore, malgré tant de travaux, les équations de la Mécanique céleste; les astronomes ont à peu près tiré d'elles, depuis Newton, au moyen de séries *pratiquement* convergentes et d'approximations heureusement conduites, tout ce qui est nécessaire pour la prévision des mouvements des corps célestes. Les analystes demanderaient davantage, mais ils n'ont plus guère d'espérances d'arriver à l'intégration au moyen de fonctions simples ou de développements toujours convergents. Ce que d'admirables recherches récentes leur ont le mieux appris, c'est l'immense difficulté du problème. Ce n'est peut-être pas tant pour les besoins de la pratique, que pour ne pas s'avouer vaincue, que l'Analyse ne se résignerait jamais à abandonner, sans une victoire définitive, un sujet où elle a rencontré tant de triomphes éclatants; et aussi, quel

plus beau champ pourraient trouver, pour essayer leurs forces, les théories naissantes ou rajeunies de la doctrine moderne des fonctions que ce problème classique de la Mécanique céleste.

C'est une joie pour l'analyste de rencontrer dans les applications des équations qu'il peut intégrer avec des fonctions connues, avec des transcendantes déjà classées. De telles rencontres sont malheureusement rares ; le problème du pendule, les cas classiques du mouvement d'un corps solide autour d'un point fixe sont des exemples simples où les fonctions elliptiques ont permis d'effectuer l'intégration. Il serait aussi extrêmement intéressant de rencontrer une question de Mécanique qui puisse être l'origine d'une découverte importante touchant la théorie des fonctions, comme la découverte d'une transcendante nouvelle jouissant de quelque propriété remarquable ; je serais embarrassé d'en indiquer un exemple, à moins de faire remonter au pendule le début de la théorie des fonctions elliptiques. La pénétration entre la théorie et les applications est ici beaucoup moindre que tout à l'heure dans les questions de Physique mathématique. Aussi s'explique-t-on que, depuis une quarantaine d'années, les travaux sur les équations différentielles ordinaires, se rattachant aux fonctions analytiques, aient en grande partie un caractère théorique tout abstrait. La théorie pure a pris ici notablement l'avance ; nous avons eu l'occasion de dire qu'il

était bon qu'il en fût ainsi, mais il y a évidemment là une question de mesure, et l'on peut souhaiter de voir d'anciens problèmes profiter des progrès accomplis depuis vingt ans dans la théorie pure. On pourrait au surplus donner facilement des exemples, et je rappellerai seulement que des travaux récents font correspondre les harmoniques successives d'une membrane vibrante aux points singuliers d'une certaine fonction.

Il arrive aussi que la théorie soit un élément de classification, en conduisant à chercher les conditions pour que la solution rentre dans un type déterminé, comme, par exemple, que l'intégrale soit uniforme. Il y a eu et il y aura encore bien des découvertes intéressantes dans cette voie; c'est ainsi que la mathématicienne la plus éminente du siècle dernier, M^me^ de Kowalesky a découvert un cas d'intégrabilité du mouvement d'un corps solide pesant, suspendu par un point fixe, au moyen des fonctions abéliennes.

## VI

### L'ANALYSE ET LA GÉOMÉTRIE

En étudiant les relations réciproques de l'Analyse avec la Mécanique et la Physique mathématique, nous avons, chemin faisant, plus d'une fois rencontré la Géométrie infinitésimale, qui a proposé tant

de problèmes célèbres ; dans maintes questions difficiles, l'heureuse combinaison du calcul et des raisonnements synthétiques a réalisé des progrès considérables, comme le montrent les théories des surfaces applicables et des systèmes triplement orthogonaux. Il est une autre partie de la Géométrie qui joue un grand rôle dans quelques recherches analytiques : je veux parler de la Géométrie de situation ou *analysis situs*. Riemann a fait à ce point de vue une étude complète des *continuum* à deux dimensions, sur laquelle repose sa théorie des fonctions algébriques d'une variable et de leurs intégrales. Quand le nombre des dimensions augmente, les questions d'*analysis situs* se compliquent nécessairement; l'intuition géométrique cesse, et l'étude devient purement analytique, l'esprit étant seulement guidé par des analogies qui peuvent être trompeuses et qui ont besoin d'être discutées de près. La théorie des fonctions de deux variables complexes indépendantes qui nous transporte dans un espace à quatre dimensions, sans tirer de l'*analysis situs* un parti aussi fructueux que la théorie des fonctions d'une variable, lui doit cependant d'utiles orientations. Voici encore un autre ordre de questions où intervient la géométrie de situation; dans l'étude des courbes tracées sur une surface, la connexion de cette surface joue un rôle important : c'est ce qui arrive notamment pour les lignes géodésiques. La question de connexité s'est d'ailleurs

présentée il y a longtemps, quand l'étude des courants électriques et du magnétisme a conduit à des potentiels non uniformes ; d'une manière plus générale, certaines intégrales multiformes de quelques équations aux dérivées partielles se rencontrent dans des théories difficiles, comme celle de la diffraction de la lumière.

A un point de vue différent, rappelons encore les relations de l'Analyse algébrique avec la Géométrie, qui se manifestent si élégamment dans la théorie des groupes d'ordre fini. Un polyèdre régulier, comme un icosaèdre, est d'une part le solide que tout le monde connaît ; c'est aussi, pour l'analyste, un groupe d'ordre fini, correspondant aux diverses manière de faire coïncider le polyèdre avec lui-même. La recherche de tous les types de groupes de mouvements d'ordre fini intéresse non seulement les géomètres, mais aussi les cristallographes ; elle conduit aux trente-deux systèmes de symétrie des cristallographes pour la particule complexe. Le groupement en systèmes de polyèdres correspondants, de manière à remplir l'espace, épuise toutes les possibilités dans la recherche de la structure des cristaux, ce qui conduit à deux cent trente types pour la symétrie interne de la matière cristallisée.

Depuis l'époque où la notion de groupe a été introduite en Algèbre par Galois, elle a pris, dans des voies diverses, des développements considérables au point qu'on la rencontre aujourd'hui dans toutes les

parties des Mathématiques. Dans les applications, elle nous apparaît surtout comme un admirable instrument de classification. Qu'il s'agisse des groupes de substitutions ou des groupes de transformations de Sophus Lie, qu'il s'agisse d'équations algébriques ou d'équations différentielles, cette doctrine, si compréhensive, permet de se rendre compte du degré de difficulté des problèmes traités et enseigne à utiliser les circonstances spéciales qui s'y présentent; à ce titre, elle doit intéresser autant la Mécanique et la Physique mathématique que l'Analyse pure.

## VII

### L'ANALYSE DANS SES RAPPORTS AVEC LA CHIMIE ET LA BIOLOGIE

Le degré de développement de la Mécanique et de la Physique a permis de donner à presque toutes leurs théories une forme mathématique; certaines hypothèses et la connaissance des lois élémentaires ont conduit aux relations différentielles qui constituent la forme dernière sous laquelle se fixent, au moins pour un temps, ces théories. Celles-ci ont vu peu à peu leur champ s'agrandir avec les principes de la Thermodynamique. Aujourd'hui, la Chimie tend à prendre à son tour une forme mathématique. Je n'en prendrai comme témoin que le Mémoire

célèbre de Gibbs, sur l'équilibre des systèmes chimiques, d'un caractère si analytique, et où il a fallu quelque effort aux chimistes pour reconnaître, sous leur manteau algébrique, des lois d'une importance considérable. Il semble que la Chimie soit sortie aujourd'hui de la méthode prémathématique, par laquelle débute toute science, et qu'un jour doive venir où s'ordonneront de vastes théories, analogues à celles de notre Physique mathématique actuelle, mais bien plus vastes et comprenant l'ensemble des phénomènes physico-chimiques. Il serait prématuré de se demander si l'Analyse trouvera dans leurs développements la source de nouveaux progrès; on ne sait même pas devant quels types analytiques on pourra se trouver. J'ai constamment parlé d'équations différentielles régissant les phénomènes; sera-ce toujours là la forme dernière qui condense une théorie? Je n'en sais certes rien, mais cependant nous devons nous souvenir que plusieurs hypothèses ont été faites de nature plus ou moins expérimentale ; parmi elles, il en est une qu'on peut appeler *principe de non-hérédité* [1], qui postule que l'avenir d'un système ne dépend que de son état actuel ou plus brièvement que les accélérations ne dépendent que des positions. Dans

1. Un physicien géomètre d'un rare talent, trop tôt enlevé à la science, Gustave Robin, insistait dans ses leçons de thermodynamique générale sur cette hypothèse d'*inhérédité*, qu'il entendait d'ailleurs d'une manière un peu plus large.

certains cas, cette hypothèse n'est pas admissible, *au moins avec les grandeurs directement envisagées;* on a même quelquefois abusé, à ce sujet, de la mémoire de la matière, qui se souvient de son passé, et l'on a parlé en termes émus de la vie d'un morceau d'acier. Différentes tentatives ont été faites pour donner une théorie de ces phénomènes, où un passé lointain semble intervenir. Il n'est peut-être pas impossible que, dans des cas aussi complexes, il faille abandonner la forme des équations différentielles, et se résigner à envisager des équations fonctionnelles plus complexes, où figureront des intégrales qui seront le témoignage d'une sorte d'hérédité. Ce sont des questions sur lesquelles nous aurons à revenir dans les chapitres consacrés spécialement à la Mécanique.

Après avoir parlé de non-hérédité, je n'ose guère toucher la question des applications de l'Analyse à la Biologie. On ne formera point sans doute de sitôt les équations fonctionnelles des phénomènes biologiques d'un type analogue à celles dont je parlais, il y a un moment; les tentatives faites jusqu'ici sont dans un ordre d'idées plus modeste. Cependant l'on s'efforce de sortir du champ purement qualificatif pour introduire des mesures quantitatives. Dans la question de la variation de certains caractères, on se livre à des mensurations et à des mesures statistiques qui se traduisent par des courbes de fréquence. Les modifications de ces

courbes avec les générations successives, leurs décompositions en courbes distinctes, pourront donner la mesure de la stabilité des espèces ou de la rapidité des mutations, et l'on sait quel intérêt s'attache à ces questions dans des recherches botaniques récentes. Il y a dans tout ceci un si grand nombre de paramètres, qu'on se demande si l'on pourra se borner à envisager seulement un nombre pratiquement limité de paramètres. Quelques lois, d'un caractère arithmétique simple, comme celles de Mendel, relatives à l'hérédité, viennent parfois donner de nouveau confiance dans le vieil aphorisme « que toutes choses s'expliquent par les nombres » ; mais, malgré de légitimes espérances, il est clair que, dans son ensemble, la Biologie est encore loin d'entrer dans une période vraiment mathématique.

Il n'en est pas de même, d'après certains économistes, pour l'Economie politique. Après Cournot, l'Ecole de Lausanne a fait un effort extrêmement intéressant pour introduire l'Analyse mathématique dans l'Economie politique. Sous certaines hypothèses, qui conviennent au moins à des cas limités, on trouve dans de savants traités une équation entre les quantités de marchandises et leurs prix, qui rappelle l'équation des vitesses virtuelles en Mécanique : c'est l'équation de l'équilibre économique. Une fonction des quantités joue dans cette théorie un rôle essentiel rappelant celui de la fonction potentielle. D'ailleurs, les représentants les

plus autorisés de l'Ecole insistent sur l'analogie des phénomènes économiques avec les phénomènes mécaniques ; « comme la Mécanique rationnelle, dit l'un d'eux, considère des points matériels, l'Economie pure considère l'*homo œconomicus* ». Naturellement, on retrouve là aussi les analogues des équations de Lagrange, moule obligé de toute mécanique. Tout en admirant ces hardis travaux, on se prend à craindre que les auteurs n'aient négligé certaines *masses cachées*, comme auraient pu dire Helmholtz et Hertz. Mais, quoi qu'il en advienne, il y a dans ces doctrines une application curieuse des Mathématiques, qui, au moins dans des cas bien circonscrits, a déjà rendu des services.

J'arrêterai là cette histoire très sommaire de quelques-unes des applications de l'Analyse avec les réflexions qu'elle m'a par moment suggérées. Je suis loin d'avoir été complet ; ainsi, j'ai omis de parler du calcul des probabilités qui demande tant de subtilité d'esprit, et dont Pascal se refusait d'expliquer les finesses au chevalier de Méré, parce qu'il n'était pas géomètre. Son utilité pratique est de premier ordre. Son intérêt théorique a toujours été considérable ; il est encore augmenté aujourd'hui, grâce à l'importance prise par les recherches que Maxwell appelait *statistical* et qui tendent à envisager la Mécanique sous un jour tout nouveau, ne voyant dans ses lois que des probabilités et des moyennes. Nous aurons l'occasion de revenir sur ces questions

On aura pu voir, dans cette esquisse, si rapide qu'elle ait été, l'origine et la raison des liens si profonds qui unissent l'Analyse à la Géométrie, à la Mécanique et à la Physique, plus généralement à toute science portant sur des grandeurs numériquement mesurables. L'influence réciproque de l'Analyse mathématique et des théories physiques a été à cet égard particulièrement instructive. Que réserve l'avenir? Des problèmes plus difficiles, correspondant à une approximation d'ordre plus élevé, amèneront des complications que nous ne pouvons que vaguement prévoir, en parlant, comme je le faisais tout à l'heure, d'équations fonctionnelles remplaçant nos équations différentielles actuelles. Mais, quoi qu'il arrive, l'Analyse mathématique restera toujours cette langue qui suivant un mot de Fourier, « *n'a point de signes pour exprimer les notions confuses* », langue capable de condenser dans ses symboles un nombre immense de résultats, et douée d'une admirable puissance de transformation et de prévision.

# CHAPITRE II

## Sciences mathématiques et Astronomie.

I. Les principes de l'Analyse. — II. Les principes de la Géométrie. III. Le développement des Mathématiques pures. — IV. La Mécanique céleste et l'Astronomie physique.

---

### I

### LES PRINCIPES DE L'ANALYSE

Dans la seconde moitié du siècle dernier, l'attention des mathématiciens s'est portée sur les fondements des différentes branches de la pensée mathématique. En particulier, depuis vingt ans, un grand nombre de publications ont paru sur la philosophie des sciences mathématiques ; elles sont bien en accord avec les tendances de l'époque où nous vivons, et où l'esprit humain applique dans des directions variées une critique de plus en plus pénétrante. Placé à ce point de vue, on a trouvé même dans le nombre entier, comme je le rappelais au début du chapitre précédent, des difficultés que n'a pas dédaignées un grand physicien comme Helmholtz. Plus

grandes encore étaient les difficultés relatives aux nombres incommensurables qui, dans l'antiquité, avaient tant troublé les géomètres grecs ; pour les analystes modernes, un nombre incommensurable représente, dans l'ensemble des nombres rationnels, une coupure qui correspond à un partage de ces nombres rationnels en deux classes.

L'étude arithmétique du concept du continu est loin d'être simple, et a donné lieu à de nombreuses recherches, parmi lesquelles il faut citer celles de M. Dedekind et de M. G. Cantor. Nous ne pouvons que nous y arrêter un moment. Pour les anciens analystes, la notion était toute intuitive, se rattachant par exemple à la vue d'un segment de droite; dans l'ensemble des points d'une droite qui forme le continu linéaire, il y a dans tout intervalle, si petit qu'il soit, des points appartenant à l'ensemble. Cette propriété a été longtemps considérée comme caractéristique du continu. En fait, l'ensemble des points d'une droite correspondant à une abscisse rationnelle jouit de la propriété précédente et est distinct du continu linéaire. A cette propriété de l'ensemble qu'on exprime souvent en disant qu'il est dense, il faut en adjoindre une autre pour caractériser l'ensemble continu.

On l'exprime, en disant que, de plus, l'ensemble doit être parfait. Voici ce que l'on entend par un ensemble parfait. Dans un ensemble de points, on appelle point-limite un point $A$ dans le voisinage

duquel (si petit que soit autour de lui ce voisinage) il y a toujours un point de l'ensemble autre que $A$. L'ensemble *dérivé* d'un ensemble donné est l'ensemble formé par ses points-limites. Un ensemble est dit *parfait*, quand il coïncide avec son dérivé. Le continu est un ensemble à la fois parfait et dense. L'ensemble des nombres commensurables est bien dense, mais il n'est pas parfait, puisqu'il ne contient pas ses points-limites qui correspondent à des nombres incommensurables.

Ces notions sont très abstraites, mais le caractère de ces spéculations est précisément une grande méfiance de l'intuition, et c'est ici un peu la lutte entre l'intuition et la logique. Au reste, on rencontre toujours dans l'histoire de la science les principales notions avec un caractère tout d'abord purement intuitif, et ce n'est que beaucoup plus tard que commence l'examen critique. Ainsi, les géomètres n'ont pas pendant longtemps éprouvé le besoin de définir la longueur d'un arc de courbe ou l'aire d'une surface ; c'étaient pour eux des notions premières. L'intuition ne pouvait évidemment amener à considérer des courbes non rectifiables ou des aires non quarrables. Il en est de même pour l'idée de fonction, c'est-à-dire de dépendance entre deux ou plusieurs grandeurs, sur laquelle repose toute la science mathématique. Il a fallu longtemps avant qu'on se rendît compte de l'étendue extraordinaire de cette notion. On doit d'ailleurs reconnaître qu'il est

indispensable pour les progrès de la science, que les choses paraissent d'abord simples. Sans vouloir trop généraliser, on peut même dire que l'erreur est quelquefois utile, et que, dans les époques vraiment créatrices, une vérité incomplète ou approchée peut être plus féconde que la même vérité accompagnée des restrictions nécessaires. L'histoire de la science confirme plus d'une fois cette remarque. Si, par exemple, Newton et Leibnitz avaient pensé que les fonctions continues n'ont pas nécessairement une dérivée, ce qui est le cas général, le calcul différentiel n'aurait pas pris naissance; de même, les idées inexactes de Lagrange sur la possibilité des développements en séries de Taylor ont rendu d'immenses services, et il est heureux que Newton ait eu au début de ses recherches pleine confiance dans les lois de Képler. Mais, sans prolonger cette digression, pour laquelle je puis d'ailleurs renvoyer au chapitre précédent, nous devons revenir à l'examen des principes de la mathématique moderne.

L'idée de fonction s'est singulièrement agrandie depuis cinquante ans. Les fonctions *usuelles* rentrent dans les fonctions analytiques de Lagrange, c'est-à-dire développables en général par la formule de Taylor; ne se tenant pas à cette définition, toute une école de géomètres a approfondi la notion de fonction prise dans toute sa généralité. Ce fut, pour l'époque, un résultat bien remarquable quand les travaux de Riemann et de Weierstrass montrèrent

qu'il existe des fonctions continues n'ayant pas de dérivées. Toutes les propositions accordées pour les fonctions usuelles doivent être reprises, quand on se place au point de vue le plus général.

On rencontre alors des énoncés très déconcertants ; ils sont particulièrement curieux quand on fait des applications géométriques. Quoi de plus simple, semble-t-il, qu'une courbe dont les coordonées sont des fonctions continues d'un paramètre variant entre deux valeurs déterminées? M. Peano a cependant montré qu'on peut choisir ces deux fonctions de telle sorte que, quand le paramètre varie, le point puisse prendre une position quelconque dans un rectangle ; nous avons donc *une courbe qui est une aire*. De tels résultats nous apprennent à nous défier de nos intuitions les plus simples ; c'est ici la revanche de la logique. On aurait aussi beaucoup étonné les géomètres du dix-huitième siècle en leur disant qu'il existe des surfaces développables qui ne sont pas des surfaces réglées. Ces énoncés supposent évidemment qu'on ne fait pas sur les fonctions dont on se sert, les hypothèses particulières admises au début du calcul différentiel.

Ici une question se pose. Qu'est-ce qui a guidé plus ou moins consciemment dans le choix de ces hypothèses? Il n'est pas douteux que le souci des applications aux phénomènes naturels n'aie très souvent guidé le mathématicien dans son choix. Une hypothèse essentielle a été celle de la continuité.

Suivant le vieil adage, *Natura non facit saltus*, nous avons le sentiment, on pourrait dire la croyance, que dans la nature il n'y a pas de place pour la discontinuité. Il est utile quelquefois de conserver le discontinu dans nos calculs, par exemple, quand nous regardons comme nulle la durée du choc en mécanique rationnelle, ou quand nous réduisons à une surface les couches de passage dans plusieurs questions de physique ; mais nous savons que, pour si petite qu'elle soit, les chocs ont une certaine durée, et les physiciens nous ont appris à mesurer l'épaisseur de certaines couches où se produisent des variations très rapides.

L'idée de dérivée s'impose déjà moins; elle répond cependant au sentiment confus de la rapidité plus ou moins grande avec laquelle s'accomplit tel ou tel phénomène. L'hypothèse relative à la possibilité de la dérivation d'une fonction a donc une origine analogue à celle de la continuité; d'ailleurs, d'après ce que j'ai dit plus haut, l'idée de continuité n'est pas aussi claire au fond qu'elle en a l'air, mais il s'agit ici de la notion intuitive du continu physique.

Dans d'autres cas, on ne voit pas de cause du même ordre dans la particularité imposée à la fonction; il en est ainsi, ce semble, pour la propriété des fonctions analytiques. Les fonctions étudiées les premières dont j'ai retracé sommairement l'histoire dans le chapitre précédent, comme les fonctions rationnelles, l'exponentielle, les lignes trigono-

métriques jouissant de cette propriété, l'attention se sera trouvée portée sur elles ; et ensuite la facilité avec laquelle cette hypothèse a permis d'aborder certaines questions a fait acquérir aux fonctions analytiques une importance considérable. C'est donc à la facilité avec laquelle nous les manions dans nos calculs qu'elles doivent le grand rôle qu'elles jouent.

Le mot *infini* revient souvent en mathématiques, mais les mathématiciens n'ont vu longtemps dans ce terme qu'une expression indiquant un nombre supérieur à tout nombre donné, laissant certains philosophes disserter sur l'infini statique et l'infini dynamique, et, comme le disait M. J. Tannery : « la notion de l'infini dont il ne faut pas faire mystère en mathématiques se réduit à ceci, après chaque nombre entier, il y en a un autre ». Depuis les travaux de M. Cantor sur les ensembles, et particulièrement sur les nombres transfinis, des points de vue nouveaux ont été introduits, dont il appartient à l'avenir de montrer l'importance. On doit attacher un grand intérêt à cette remarque, d'après laquelle l'ensemble des nombres rationnels est *énumérable*, tandis que l'ensemble des nombres ne l'est pas, ce qui revient à dire que les nombres rationnels peuvent être affectés à un numéro d'ordre déterminé, tandis que les nombres irrationnels ne sont pas susceptibles d'être *comptés ;* une sorte de brèche est ainsi faite dans l'*infini*. Il serait trop délicat de nous

arrêter ici sur les nombres ordinaux transfinis. Nous donnerons plus aisément une idée des nombres cardinaux transfinis, en revenant aux ensembles. Deux ensembles, entre les éléments desquels peut être établie une correspondance uniforme, sont dits avoir la même puissance ou le même nombre cardinal. Ainsi l'ensemble de tous les nombres rationnels a la même puissance ou le même nombre cardinal que l'ensemble des nombres entiers. Ce nombre cardinal, que nous pouvons appeler $a$, est le premier nombre cardinal transfini. A l'ensemble des nombres réels correspondra au contraire une puissance ou un nombre cardinal différent de $a$; désignons-le par $c$. Il existe des ensembles dont la puissance ou le nombre cardinal n'est ni $a$ ni $c$; ainsi, on peut montrer qu'à l'ensemble de toutes les fonctions possibles d'une variable définies dans un certain intervalle correspond un nombre cardinal plus grand que $c$. Ceci suffit à faire entrevoir une sorte d'arithmétique des nombres transfinis, sur laquelle on a déjà publié de nombreux travaux. Il n'y aura lieu évidemment de la développer que si ces vues se montrent fécondes dans l'analyse; la considération des nombres transfinis a permis déjà de découvrir certains théorèmes, mais on doit dire qu'ils ont pu ensuite être obtenus par une autre voie. Quoi qu'il en soit, ces spéculations sur l'infini forment un chapitre tout nouveau dans la science mathématique de ces dernières années.

L'extension de nos idées sur les fonctions et sur l'infini n'est pas la seule qu'aient poursuivie depuis trente ans les mathématiciens qui s'intéressent aux principes de la science; la question des quantités complexes a vivement excité l'intérêt, d'autant plus qu'une certaine obscurité planait sur elle, qu'entraînait le mot souvent usité, mais peu heureux, de quantités imaginaires. Le sujet ne présente plus aujourd'hui rien de mystérieux. En supposant que les lois commutative et associative subsistent, Weierstrass a réalisé des systèmes de nombres où figurent $n$ symboles et où tous les nombres sont formés linéairement avec ces symboles; il fait en outre l'hypothèse que la somme, la différence, le produit et le quotient de deux nombres du système font eux-mêmes partie du système. Il y a une infinité de tels systèmes de nombres complexes. Ces nombres diffèrent seulement en un point des nombres complexes ordinaires. Quand $n$ est supérieur à deux, il peut exister des nombres différents de zéro, dont le produit par certains autres nombres est nul. On appelle ces nombres des diviseurs de zéro. Malgré cette singularité, cette nouvelle algèbre est réductible à l'algèbre des nombres complexes ordinaires; il n'y a donc là qu'une curiosité et nullement un instrument nouveau dont puisse profiter l'analyse mathématique.

Nous avons admis que les lois commutative et associative subsistaient dans l'algèbre précédente.

On s'est placé à un point de vue plus général en supposant que seule la loi associative subsiste, abandonnant la loi commutative de telle sorte que le produit de deux facteurs ne soit pas nécessairement indépendant de l'ordre des facteurs. On a alors une algèbre beaucoup plus générale; un exemple célèbre d'un système à quatre unités est fourni par les *quaternions* d'Hamilton. De nombreux travaux ont établi des classifications dans cette théorie. On demandera si ce vaste symbolisme est susceptible d'accroître un jour la puissance de l'analyse. Il est permis de penser que ces algèbres nouvelles n'auront d'autre intérêt pratique que de conduire à des notations plus condensées, ce qui peut d'ailleurs avoir son prix; on le voit au reste pour les quaternions, dont l'emploi si prisé en Angleterre par les physiciens n'est nulle part indispensable

## II

### LES PRINCIPES DE LA GÉOMÉTRIE

Après les principes de l'analyse, l'étude des bases de la géométrie n'a pas moins attiré l'attention : tout n'est pas si clair que le croient beaucoup de personnes dans les commencements de la géométrie, et d'Alembert a pu écrire jadis que la définition et les propriétés de la ligne droite sont l'écueil et le scandale de la géométrie. Nous sommes aujourd'hui bien convaincus qu'il y a dans toute science un point au delà duquel on ne peut remonter : il faut poser certaines données,

certains concepts, et formuler au sujet de ces concepts des axiomes ou postulats qui reviennent, au fond, à les définir. On posera, par exemple, au début de la géométrie élémentaire, les concepts de point, de ligne droite, et on formulera cet axiome que deux points déterminent toujours une droite. C'est pour le géomètre un difficile problème que d'établir la géométrie sur un système complet et non contradictoire d'axiomes indépendants ; dans ces derniers temps, des travaux remarquables, tels que ceux de M. Veronese et surtout de M. Hilbert, ont été publiés dans cette voie. Suivant qu'on adopte tel ou tel système d'axiomes, on aura telle ou telle géométrie. On peut maintenant se demander quelle est l'origine de ces postulats. Pour Kant, la source de nos connaissances géométriques est dans l'intuition, et les axiomes, plus ou moins explicitement formulés au début de la géométrie ont un caractère de nécessité absolue ; l'espace est pour Kant une forme *a priori* de notre sensibilité. Les géomètres ne souscrivent pas en général à cette opinion, depuis qu'on a montré que diverses géométries, exemptes de toute contradiction logique, peuvent être obtenues en partant de divers systèmes de postulats, mais je sais que certains philosophes y voient une confirmation de la doctrine kantienne, selon laquelle, entre toutes les formes logiquement possibles d'espace, une seule nous est donnée et imposée, comme forme d'intuition, par notre nature d'être sensibles, et non par notre raison.

L'observation et l'expérience jouent un rôle indis-

pensable dans la forme de nos connaissances géométriques ; mais, tout en admettant ce point indiscutable pour la plupart, les avis sont encore très partagés. Quelques physiciens voient uniquement dans les axiomes des inductions basées sur les observations et les mesures faites sur les corps : c'est l'empirisme géométrique. D'autres attribuent un rôle plus ou moins grand à l'esprit travaillant sur les données de l'expérience. Pour certains même, comme M. Poincaré, le concept de *groupe*, sur lequel nous reviendrons dans un moment, et dont il a été déjà question au chapitre précédent, préexiste dans notre esprit et s'impose comme forme de notre entendement; en outre, plusieurs interprétations de l'expérience sont possibles, et parmi celles-ci l'esprit a choisi la plus *commode* et la plus *simple*. Si l'on veut presser le sens de ces termes, on se trouve en présence de graves difficultés, et même, à un point de vue purement mathématique, on pourrait prétendre que dans certaines questions les géométries non euclidiennes sont plus simples que la géométrie euclidienne. Les biologistes, toujours dominés par la thèse évolutionniste, ne manquent pas de demander aux mathématiciens ce que c'est que l'*esprit humain* et sa *logique* ; pour eux la commodité et la simplicité résultent de l'hérédité et de l'habitude, et la logique n'est que le résumé de l'expérience ancestrale. Dans un article sur la logique et l'expérience, M. Le Dantec plaisante avec beaucoup d'es-

prit, ceux qui parlent d'un monde non euclidien, et il ajoute : « Si les choses étaient autrement, nous aussi nous serions autrement, mais nous ne pourrions exister qu'adéquats aux choses ». Sans discuter sur le sens du mot *adéquat*, je dirai simplement qu'on peut regarder la géométrie comme une *théorie* relative aux *faits géométriques*, en entendant le mot de *théorie* comme nous le ferons plus loin en mécanique et en physique. La *théorie euclidienne*, rendant bien compte des faits géométriques observés, est fixée dans l'espèce humaine par une très longue hérédité; elle est devenue commode et simple. On peut faire un rapprochement entre l'espace et l'éther. La théorie de l'éther, adoptée seulement depuis un siècle, n'a pas pour nous, tant s'en faut, le même degré de commodité et de simplicité; aussi avons-nous encore tant de mal à *penser en éther*, pour employer une expression pittoresque de M. Langevin, mais cela pourra être aisé dans quelques dizaines de siècles.

Ceci dit, nous allons rester maintenant sur le terrain mathématique, et sur celui de la logique au moins actuelle. J'ai fait tout à l'heure allusion à divers systèmes possibles de postulats. Si on ouvre un traité de géométrie élémentaire, on ne trouve formulé bien explicitement qu'un seul axiome : il porte le nom de *postulatum d'Euclide*. En réalité, un nombre considérable d'axiomes sont sous-entendus, et, en étudiant les plus récents travaux sur les prin-

cipes de la géométrie, on est effrayé à la vue de la longue liste des postulats nécessaires à poser pour que la géométrie ait toute la rigueur logique qu'on lui attribue généralement. Les plus importants se rapportent aux concepts de droites, de plans, d'angles, de congruences ; il en est un autre, d'une nature différente, qu'il pourrait paraître inutile de formuler, c'est l'axiome de continuité ou axiome d'Archimède. Au point de vue logique, ce serait une erreur. Ainsi on a pu construire des géométries étranges dans lesquelles, en portant à partir d'un point d'une droite une succession de segments égaux, il n'est pas possible d'atteindre un point déterminé de la droite, quelque grand que soit le nombre de ces segments ; or, l'axiome d'Archimède affirme précisément cette possibilité.

Tout le monde aujourd'hui a entendu parler de la géométrie euclidienne et des géométries non euclidiennes. Un *postulatum*, célèbre dans la science, porte le nom d'Euclide. Le célèbre géomètre grec demande que l'on accorde que par un point on ne peut mener qu'une parallèle à une droite (l'énoncé d'Euclide avait une forme un peu différente, mais il revient entièrement au précédent). Il avait vainement essayé de rattacher logiquement cette affirmation aux données plus ou moins intuitives sur lesquelles il fondait la géométrie. Pendant longtemps, on chercha une démonstration du fameux *postulatum*. Ces démonstrations sont intéressantes à

parcourir, on y retrouve tous les genres d'erreurs souvent rééditées dans le courant du siècle dernier, et que reverra sans doute de temps en temps le siècle présent; ce sont toujours des substitutions à l'hypothèse euclidienne d'une autre hypothèse que l'auteur juge plus évidente. Quoiqu'il se termine par des erreurs, il faut signaler cependant à part un travail d'un jésuite italien le père Saccheri, paru en 1733 sous le titre pittoresque « Euclides ab omni nœvo vindicatus ». Au lieu de substituer à l'hypothèse euclidienne quelque autre postulat paraissant plus plausible, le père Saccheri veut atteindre le but cherché en montrant qu'on rencontre des contradictions, si on n'admet pas le célèbre postulat. Considérons avec lui un quadrilatère plan $ABCD$, dans lequel deux côtés opposés $AD$, $BC$ sont égaux et perpendiculaires à un troisième $AB$. Si on admet l'hypothèse euclidienne, les angles $C$ et $D$ sont droits; si on ne l'admet pas, les angles sont encore égaux, et on peut supposer qu'ils sont droits, aigus ou obtus. Saccheri croit pouvoir montrer qu'on arrive à des contradictions, si on n'est pas dans le cas de l'angle droit; cette partie du mémoire est mauvaise, mais l'auteur fait auparavant quelques remarques fondamentales qui le placent, malgré lui, parmi les précurseurs des géométries non euclidiennes. Il montre que, suivant que l'on sera dans le cas de l'angle droit, de l'angle aigu ou de l'angle obtus, la somme des angles d'un triangle sera égale, inférieure ou

supérieure à deux droits, et il voit très bien que celle de ces circonstances se présentant pour un seul triangle se présentera pour tout autre triangle, proposition que Legendre devait retrouver plus tard pour le cas où la somme est égale ou inférieure à deux droits.

Dans cet historique des géométries non euclidiennes, si rapide qu'il soit, on doit citer encore Lambert dont les résultats les plus remarquables sont relatifs à l'aire d'un triangle, quand on abandonne l'axiome d'Euclide, aire dans l'expression de laquelle figure l'excès positif ou négatif de la somme des angles du triangle sur deux angles droits ; la géométrie sphérique occupa beaucoup Lambert et il eut l'intuition très nette que le cas où la somme des angles d'un triangle est moindre que deux droits correspond à la géométrie sur une sphère de rayon imaginaire. Enfin Legendre s'occupa longuement du *postulatum* d'Euclide ; en particulier, il montra très simplement que dans un triangle, la somme des angles d'un triangle ne peut surpasser deux droits, mais sa démonstration, il ne faut pas l'oublier, suppose que la droite est infinie, hypothèse qui n'est pas vérifiée dans la géométrie sphérique où le rôle de la droite est tenu par les arcs de grand cercle. Il résulte aussi clairement des recherches de Legendre que le postulat d'Euclide revient à dire que la somme des angles d'un triangle est égale à deux droits. On peut, d'ailleurs, donner bien d'autres

formes au *postulatum* d'Euclide, en posant qu'il existe des droites équidistantes, ou encore qu'il existe des figures semblables. L'illustre Gauss, qui, dès les dernières années du XVIII^e siècle, avait approfondi toutes ces questions, sans en rien dire que dans quelques lettres particulières publiées il y a seulement peu d'années, regardait l'axiome d'Euclide comme équivalent à l'assertion que l'aire d'un triangle peut grandir indéfiniment.

Comme je viens de le dire, Gauss, craignant sans doute « les clameurs des béotiens », dont il parle dans une de ses lettres, ne publia rien des recherches où il établissait que la négation du *postulatum* d'Euclide n'entraîne aucune contradiction. A la géométrie non euclidienne, où la droite a une longueur infinie, se rattachent les noms de Lobatschefski et de Bolyai, qui, indépendamment l'un de l'autre, édifièrent une géométrie où la somme des angles d'un triangle est inférieure à deux angles droits. Le point de départ de Lobatschefski et de Bolyai est le suivant : étant donnés dans le plan une droite et un point, les droites menées par le point se partagent en deux classes, suivant qu'elles rencontrent ou non la droite donnée. Ces deux catégories de droites sont séparées par les *deux parallèles* (coïncidentes dans le cas euclidien) que l'on peut mener du point à la droite. L'hypothèse des deux parallèles menées par un point à une droite, caractérise le système de géométrie qu'on appelle souvent *géométrie hyperbolique*, et

qui correspond au cas de l'angle aigu dans le quadrilatère de Saccheri, dont je parlais plus haut. Le cas où les deux parallèles coïncident correspond à la géométrie euclidienne ou *parabolique*; c'est le cas de l'angle droit de Saccheri. Un chapitre fondamental de la géométrie hyperbolique concerne la trigonométrie non euclidienne, c'est-à-dire les relations entre les angles et les côtés d'on triangle. Comme l'avait prévu Lambert, la géométrie hyperbolique trouve une interprétation dans la géométrie analytique sur une sphère de rayon imaginaire. A un tout autre point de vue, Beltrami donna plus tard de la géométrie de Lobatschefski une représentation remarquable en montrant que la géométrie plane du géomètre russe est identique à la géométrie sur les surfaces à courbure constante négative, du moins quand on se borne à une portion limitée du plan et de la surface correspondante.

Dans la géométrie hyperbolique, on peut mener par un point deux parallèles à une droite. On peut admettre, au contraire, avec Riemann, que par un point on ne puisse pas mener de droite ne rencontrant pas une droite ; on aura alors une seconde géométrie non euclidienne dite *elliptique*, dans laquelle la somme des angles d'un triangle dépasse deux droits. Ici le plan n'est plus infini, c'est-à-dire que les distances sur une géodésique restent finies. La géométrie elliptique peut être interprétée par la considération des sphères de l'espace euclidien ;

toutefois, cette interprétation n'est valable que pour une portion limitée du plan non euclidien et non pour le plan tout entier. Une autre interprétation dans l'espace ordinaire de la géométrie plane elliptique, valable pour le plan entier, a été donnée par M. Klein ; considérons dans l'espace ordinaire l'ensemble des droites et des plans passant par un point, puis les angles dièdres formés par deux tels plans, toute relation entre ces éléments sera la traduction d'une relation dans le plan non euclidien, en substituant aux mots *droite*, *plan*, *angle dièdre* les mots *point*, *droite* et *angle*.

On s'est naturellement demandé comment on pouvait être assuré que, dans les déductions des géométries non euclidiennes, on ne rencontrerait jamais de contradictions. Les interprétations, auxquelles il a été fait plus haut allusion, sauf celles de M. Klein pour la géométrie elliptique, ne donnent pas une réponse satisfaisante, mais celle-ci peut être fournie par la considération des formules auxquelles on arrive en géométrie hyperbolique et qui ne sont autres, comme je le disais tout à l'heure, que celles de la trigonométrie sphérique ordinaire, en supposant le rayon de la sphère purement imaginaire.

Toutefois, si l'on est ainsi assuré que le *postulatum* d'Euclide ne peut être démontré en restant dans le plan, il reste un doute sur l'impossibilité de la démonstration en employant des constructions hors du plan. L'étude des géométries ne doit

donc pas se borner au plan ; ce fut là l'œuvre de Riemann, d'Helmholtz et, il y a quinze ans, de Sophus Lie. Tous trois se placent à un point de vue analytique et considèrent l'espace comme une multiplicité, c'est-à-dire qu'un point est défini par un système de trois nombres qu'on appelle les *coordonnées du point* ; on ne pose plus alors ici la notion de plan et de droite, on part du point comme élément. Riemann a été dans cette voie, alors toute nouvelle, un initiateur. Considérant même des espaces à un nombre quelconque de dimensions, il introduit l'importante notion de *courbure* d'un espace, généralisant les notions classiques dues à Gauss sur la courbure des surfaces. Particulièrement importants sont les espaces à *courbure constante*. Un caractère fondamental des espaces à courbure constante est qu'on peut dans ces espaces déplacer une figure sans altérer ses longueurs et procéder dans les démonstrations par superposition des figures. Pour le cas de deux dimensions, suivant que la courbure constante est négative ou positive, on a la géométrie hyperbolique ou elliptique dont nous parlions plus haut. Dans un espace à trois dimensions à courbure constante, on a des déplacements possibles qui dépendent de *six* paramètres, et, en étudiant ces déplacements, on peut envisager à un nouveau point de vue les hypothèses fondamentales de la géométrie. C'est Helmholtz qui posa le premier la question sur ce terrain. La théorie des groupes n'était pas encore

créée à l'époque où le célèbre physicien écrivait son mémoire ; il était presque inévitable qu'il commît quelques erreurs. Cette étude fut complètement reprise par Sophus Lie.

J'ai déjà parlé plusieurs fois de *groupes;* c'est une notion qui joue un rôle fondamental dans la science de notre époque, sur laquelle il convient de dire quelques mots. Imaginons, avec Sophus Lie, que $n$ relations permettent de transformer $n$ variables en $n$ autres variables, ces relations dépendant d'un certain nombre de paramètres arbitraires. Faisons de plus l'hypothèse que deux transformations de cette forme effectuées successivement donnent une transformation rentrant dans le même type, les valeurs des paramètres étant seulement changées. S'il en est ainsi, on a un *groupe de transformations*. Lie a fait la découverte capitale que la recherche de tous ces groupes, pour un nombre donné de variables et de paramètres, se ramène à l'intégration d'équations différentielles ordinaires. Je ne citerai qu'un résultat, le plus simple de tous ceux qu'a obtenus Sophus Lie ; quand il n'y a qu'une seule variable, le groupe peut, par un choix convenable de cette variable, être ramené au groupe linéaire et contient au plus trois paramètres.

Revenons aux principes de la géométrie et aux résultats obtenus par Lie. On a dans l'espace, dont on considère une portion limitée, un groupe de mouvements à *six* paramètres sur lequel on fait diverses

hypothèses. D'abord ces mouvements laissent invariable une certaine fonction des coordonnées de deux points quelconques. L'origine de cette hypothèse s'aperçoit d'elle-même : en langage ordinaire et sans signe algébrique, on peut dire grossièrement que, en la faisant, on veut qu'il y ait relativement à deux points de l'espace *quelque chose* qui reste invariable après le mouvement; on pourra appeler ce quelque chose la distance de deux points. En second lieu, on veut, comme le disait Helmholtz, que le mouvement *libre* soit possible dans une certaine région de l'espace. Voici ce qu'on doit entendre par cette hypothèse complexe. Tout d'abord, quand un point de la région est fixé, tout autre point de cette région, *sans aucune exception*, décrit une surface (multiplicité à deux dimensions). Ensuite, quand deux points sont fixés, un point arbitraire (des exceptions étant possibles) décrit une courbe (multiplicité à une dimension); enfin, si trois points arbitraires sont fixés dans la région, tous les points de celle-ci restent en repos (des exceptions étant possibles). Telles sont les conditions que nous imposons à l'espace. Il y a seulement deux types d'espace satisfaisant à ces conditions. C'est tout d'abord l'espace ordinaire, ou euclidien auquel nous sommes habitués ; puis deux espaces, qu'on peut appeler *non euclidiens* et qui sont dans le cas de trois dimensions les analogues des plans hyperbolique ou elliptique de tout à l'heure. C'est là une proposition bien remarquable

et qui montre que les espaces euclidien et non euclidien sont les seuls où on puisse faire logiquement les hypothèses qui, dégagées, bien entendu, de leur forme scientifique, sont regardées, par quiconque n'a pas réfléchi à ces questions, comme ayant un caractère nécessaire.

La démonstration du résultat précédent est très délicate. Ainsi les mots « sans aucune exception » que nous avons soulignés plus haut sont d'une extrême importance. Si l'on cherche le groupe des mouvements à six paramètres satisfaisant à la seconde condition, on ne trouve que les groupes euclidiens et non euclidiens, mais si on supprime les mots soulignés, on reconnaît qu'il existe d'autres groupes que les précédents.

Ajoutons encore que les problèmes analogues dans le plan, admettent des solutions entièrement différentes : les espaces à deux dimensions euclidiens et non euclidiens ne sont pas caractérisés par les propriétés qui leur appartiennent uniquement dans le cas de trois dimensions. Cette circonstance n'avait pas autrefois échappé à Helmholtz. Si nous revenons à la question posée tout à l'heure relativement à l'impossibilité de toute contradiction, il est clair que du point de vue analytique où se place Sophus Lie, il n'y a aucune difficulté.

Au point de vue du géomètre norvégien, l'étude des principes de la géométrie peut donc être regardée comme épuisée, mais on ne doit pas oublier qu'il

se borne à considérer une petite portion de l'espace et suppose d'ailleurs que les fonctions servant à caractériser les groupes de mouvement satisfont aux conditions ordinaires de l'analyse infinitésimale. Clifford autrefois et Klein plus récemment ont appelé l'attention sur la question de la *connexité* de l'espace qui est extrêmement intéressante. Il est facile de se rendre compte de ce qu'on entend par là, en se bornant au cas d'une multiplicité à deux dimensions; la surface d'une sphère est différente de la surface d'un tore, au point de vue des courbes fermées tracées sur la surface. Sur la première, toute ligne fermée partage la surface sphérique en deux régions, tandis qu'il en est autrement sur la surface du tore, où on peut tracer deux courbes, soit un parallèle et un méridien qui ne limitent aucune portion de la surface ; l'ordre de *connexité* des deux surfaces n'est pas le même. Peu importe quelle est la connexité de l'espace, quand on se borne à envisager une partie assez petite, mais il n'en va plus de même, quand on considère l'espace dans son ensemble. Nous ne savons évidemment rien de la connexité de l'espace où nous vivons; nous ne pouvons que faire la supposition qu'il est simplement connexe.

Nous nous sommes arrêté un peu longuement sur les géométries dites non euclidiennes, qui ont le plus de rapports avec notre géométrie ordinaire. Ces géométries d'espaces à courbure constante pourront

très peu différer de celle-ci, si la courbure est très voisine de zéro. On n'a pas manqué de dire que la courbure de notre espace n'était peut-être pas nulle, mais seulement presque nulle; c'était, semble-t-il, l'opinion de Gauss, et il n'est pas douteux que la pensée de vivre dans un espace dont la courbure n'est pas nulle a donné une certaine popularité aux géométries non euclidiennes. Dans cet ordre d'idées, on peut aller plus loin, admettre, par exemple, que la courbure de l'espace varie avec les lieux et avec le temps. Pour quelques-uns, ce sont là de pures rêveries : ils pensent que quelque soit l'espace où nous vivions, nous aurions toujours fait une interprétation de nos sensations dans le langage euclidien qui est pour nous le plus commode. C'est un point auquel j'ai déjà fait allusion plus haut, et sur lequel on peut se donner le plaisir de disserter indéfiniment.

Nous sommes loin d'avoir épuisé l'ensemble des études se rapportant aux principes de la géométrie. Dans ces dernières années, la question de l'indépendance des postulats a surtout préoccupé les géomètres allemands, et c'est en construisant des géométries affranchies de tel axiome, que l'indépendance de ces axiomes a été établie par M. Hillbert. On remarquera aussi combien il est inexact de parler, comme on le fait quelquefois. des *trois* seules géométries possibles (hyperbolique, parabolique, elliptique).

Le nombre des géométries logiquement possibles est infini ; tout dépend des systèmes de postulats que l'on adopte. Déjà Riemann avait considéré dans sa célèbre dissertation inaugurale, des géométries dans des espaces à courbure variable d'un point à l'autre. La liste serait longue à dresser des géométries, analogues aux géométries non euclidiennes, qui portent généralement un nom illustre précédé d'une négation. Une des plus curieuses est la géométrie non-archimédienne, où on n'admet pas l'axiome d'Archimède, dont j'ai dit un mot tout à l'heure ; dans cette géométrie, les procédés par exhaustion ne peuvent être employés dans les démonstrations. Ceci est particulièrement intéressant pour la mesure des aires, et on peut faire à ce sujet quelques remarques concernant notre géométrie usuelle. En géométrie plane, deux polygones équivalents sont égaux par addition ou par soustraction, c'est-à-dire peuvent être décomposés en triangles égaux, ou bien peuvent être regardés comme des différences de polygones susceptibles d'être ainsi décomposés. Il n'en est pas de même dans la géométrie de l'espace ; Gauss avait déjà il y a longtemps appelé l'attention des mathématiciens sur ce point. On a récemment établi que deux tétraèdres qui ont même base et des hauteurs égales ne sont pas toujours égaux par addition ou soustraction, c'est-à-dire ne peuvent pas être décomposés en tétraèdres égaux ou être regardés comme des différences de polyèdres décomposables en

tétraèdres égaux. La stéréométrie ne peut donc pas, comme la planimétrie, être faite sans recourir à des procédés d'exhaustion ou de limite.

Mais j'en ai dit assez sur les principes de la géométrie. Pour beaucoup de personnes, les recherches de ce genre paraîtront de bien étranges imaginations. Il n'est cependant pas sans intérêt de mettre à nu les très nombreux postulats indépendants qui sont à la base de notre géométrie, et qui n'ont pas les caractères de nécessité logique que leur attribue l'intuition, celle-ci n'épuisant pas toutes les possibilités logiques. Tout esprit philosophique doit à ce titre s'y intéresser. Au point de vue mathématique, l'étude des principes de la géométrie a offert, comme nous l'avons dit, à Sophus Lie un beau champ d'applications pour la théorie des groupes de transformations qu'il venait de créer. De même, quarante ans auparavant, la théorie des formes quadratiques de différentielles s'était développée grâce aux recherches de Riemann sur les hypothèses qui sont à la base de la géométrie. C'est ainsi que des études, qui paraissent avoir d'abord un caractère purement philosophique, ont contribué aux progrès des sciences mathématiques.

## III

### LE DÉVELOPPEMENT DES MATHÉMATIQUES PURES

Il ne serait pas possible d'entrer dans quelques détails sur les progrès des mathématiques pures sans faire intervenir des symboles ou des signes d'opérations qui ne seraient pas ici à leur place. Tâchons seulement d'indiquer les voies dans lesquelles se poursuivent avec le plus de succès les recherches d'analyse et de géométrie.

Nous avons déjà dit un mot de l'importance qu'ont prise, à cause de leur simplicité même, les fonctions *analytiques*. Depuis Lagrange, et surtout après les travaux de Cauchy, de Weierstrass et de Riemann, la théorie des fonctions analytiques est devenue une branche maîtresse de l'analyse mathématique. Elle doit son brillant essor à la découverte de quelques propositions générales parmi lesquelles se trouvent au premier rang les théorèmes de Cauchy, sur l'intégration le long d'un contour. Depuis vingt ans, une partie importante de l'effort mathématique a été consacrée soit aux fonctions analytiques en général, soit à certaines fonctions spéciales. Ne pouvant entrer ici dans le détail de ces recherches abstraites, qu'il me suffise de citer les noms de MM. Poincaré, Mittag-Leffler, Picard, Appell, Goursat, Painlevé, Hadamard et Borel entre bien d'autres.

Les singularités des fonctions analytiques et leurs diverses représentations par des séries, des intégrales définies, des fractions continues ont été étudiées d'une manière approfondie. Parmi les travaux les plus récents relatifs aux développements en série, mentionnons les développements dus à M. Mittag-Leffler, les études de M. Hadamard sur les séries de Taylor. Les séries divergentes avaient été quelquefois employées par les géomètres du dix-huitième siècle et du commencement du dix-neuvième siècle, leur pénétration les avait fait le plus souvent échapper aux dangers des raisonnements fondés sur de telles considérations, mais sous l'influence de Cauchy, de Gauss et aussi d'Abel qui, dans une de ses lettres, traite d'invention du diable les séries divergentes, celles-ci avaient été proscrites de l'analyse mathématique. Dans ces derniers temps, M. Borel les a réhabilitées en introduisant la notion de série divergente sommable et l'utilisant pour l'étude des propriétés des fonctions. Parmi les fonctions particulières, après le merveilleux développement de la théorie des fonctions algébriques d'une variable et des transcendantes qui s'y rattachent, après les brillants travaux de M. Poincaré sur les fonctions fuchsiennes, les fonctions algébriques de deux variables devaient solliciter l'effort des chercheurs. Les études de M. Picard sur ces questions concernent le point de vue transcendant, elles se rapportent aux intégrales de différentielles totales et aux inté-

grales doubles que l'on peut attacher à une surface algébrique. Les travaux de M. Noether, de MM. Castelnuovo, Enriques et Humbert se rapportent surtout au point de vue géométrique et algébrique. Le champ si vaste des fonctions analytiques de plusieurs variables est maintenant attaqué de différents côtés, et les résultats déjà obtenus promettent pour un avenir prochain une ample moisson de découvertes.

Si le concept de fonction analytique comprend aujourd'hui dans son domaine les fonctions les plus importantes de l'analyse, on ne doit pas cependant négliger d'approfondir l'idée de fonction dans toute sa généralité. J'en ai déjà montré plus haut le grand intérêt philosophique. Depuis les travaux déjà anciens de Riemann, de Weierstrass et de Hankel, ces études ont été poursuivies avec succès par MM. Darboux et Jordan, par M. Dini, M. Volterra et quelques jeunes géomètres, parmi lesquels on peut citer M. Baire et M. Lebesgue. A cet ordre d'idées se rattachent les travaux extrêmement nombreux sur les séries de Fourier qui jouent un si grand rôle en mathématiques pures et dans presque toutes les questions de physique mathématique. On rencontre sans doute dans beaucoup de ces recherches des fonctions bien bizarres, et quelques-uns demanderont à quoi pourront servir des fonctions aussi singulières. Il est facile de répondre que les fonctions n'ont pas besoin de servir à quelque chose, et que l'étude de l'idée de fonction mérite d'être faite pour elle-même. Mais

de plus, avec la complexité croissante des phénomènes naturels dont nous devons adorder l'étude, les images que nous pourrons nous en faire ne nous conduiront-elles pas à employer, pour leurs représentations, d'autres fonctions que les fonctions analytiques? Il serait téméraire de formuler une réponse négative. D'autres considérations montrent encore la nécessité de ne pas se borner systématiquement aux fonctions analytiques, comme nous le dirons dans un moment.

Toute l'histoire de la science montre les rapports qui unissent l'analyse pure et les phénomènes naturels; c'est ce qu'on a vu dans le chapitre précédent. Cette solidarité se traduit mathématiquement quand on a ramené l'étude d'un phénomène à des équations différentielles; ainsi, pour Fourier, l'étude de la propogation de la chaleur se ramène à une équation aux dérivées partielles que l'on devra intégrer à l'aide de conditions aux limites propres à chaque cas. De même, tous les résultats de la théorie mathématique de l'élasticité se concentrent dans un système classique d'équations différentielles. Nous reviendrons sur cette réduction au point de vue de la mécanique et de la physique, quand nous parlerons de l'explication des phénomènes naturels. Nous avons montré dans le premier chapitre l'intérêt considérable s'attachant à l'étude des équations différentielles. Des méthodes variées ont été proposées pour démontrer l'existence des intégrales rem-

plissant des conditions diverses; il ne faudrait pas croire d'ailleurs que de telles recherches soient simplement des raffinements de rigueur intéressant seulement les purs analystes; on ne saurait trop répéter que *la vraie rigueur est féconde*, se distinguant par là d'une autre purement formelle et ennuyeuse, qui répand l'ombre sur les problèmes qu'elle touche. Il est d'une extrême importance dans maintes applications, de savoir dans quel champ se trouveront certainement définies les intégrales déterminées par les conditions initiales : A cette question doivent répondre les recherches précédentes. C'est ici qu'il est parfois très important de ne pas se borner systématiquement aux fonctions analytiques; les hypothèses inutiles ainsi introduites ont conduit souvent à délimiter pour les intégrales des champs d'existence beaucoup moins étendus que ceux qui peuvent être obtenus en se plaçant à un point de vue plus général.

Les problèmes posés par l'étude des équations différentielles sont en nombre immense. Depuis vingt ans des voies nouvelles ont été ouvertes et dans des directions variées. Il faudra sans doute une longue suite d'efforts pour venir à bout des questions posées, mais nous commençons à nous rendre compte de la nature des difficultés qu'il faudra vaincre. La plupart des géomètres qui se sont occupés de la théorie générale des fonctions analytiques ont apporté aussi leurs contributions à

l'étude des équations différentielles ordinaires, commencée jadis à ce point de vue par Cauchy et continuée par Briot et Bouquet et par Fuchs. Les recherches les plus récentes qui doivent être mentionnées dans cet ordre sont celles de M. Painlevé que la considération de certaines équations du second ordre a conduit à des transcendantes nouvelles irréductibles à des transcendantes déjà connues.

La physique mathématique indiquait, nous l'avons dit, des types de problèmes du plus haut intérêt ; cette voie féconde est suivie par de nombreux chercheurs. C'est actuellement un des sujets qui doivent attirer le plus les mathématiciens. On y risque moins que dans d'autres domaines de s'égarer dans des impasses et dans des recherches stériles, les questions étant le plus souvent posées par la physique. Ici encore on retrouve la distinction entre les fonctions analytiques et les fonctions non analytiques. Il est des phénomènes où on ne rencontrera certainement que des fonctions analytiques, car on a pu établir que les équations différentielles qui les régissent n'avaient que des intégrales analytiques. Pour d'autres, au contraire, il en est tout autrement ; tels sont, par exemple, ceux où on rencontre des propagations d'ondes. Il y a là, pour le mathématicien, des problèmes de natures très différentes où des résultats extrêmement remarquables ont été récemment obtenus.

Je viens de dire quelle mine fructueuse a été et

sera pour l'analyste la mécanique et la physique mathématique. On a pu voir dans le premier chapitre qu'il ne faudrait pas cependant professer une opinion trop systématique sur cette marche parallèle de la théorie pure et des applications comme le faisait, avec Laplace, Fourier, Poisson, la brillante école française de physique mathématique du commencement du siècle dernier.

Pour eux, l'Analyse pure n'était que l'instrument, et Fourier, en annonçant à l'Académie des Sciences les travaux de Jacobi, disait que les questions de la Philosophie naturelle doivent être le principal objet des méditations des géomètres; « on doit désirer, ajoutait-il, que les personnes les plus propres à perfectionner la science du calcul dirigent leurs travaux vers ces hautes applications si nécessaires au progrès de l'intelligence humaine ». Ce désir très légitime ne doit pas être exclusif. Ce serait méconnaître d'abord la valeur philosophique et artistique des mathématiques. De plus, des spéculations théoriques sont restées pendant longtemps éloignées de toute application, quand un moment est venu où elles ont pu être utilisées. On n'en peut pas citer d'exemple plus mémorable que le concept des sections coniques élaboré par les géomètres grecs, qui resta inutilisé pendant deux mille ans, jusqu'au jour où Kepler s'en servit dans l'étude de la planète Mars. Si, en plus d'une occasion les mathématiques appliquées ont donné l'impulsion en posant les pro-

blèmes, il y a en revanche des cas où le développement de la théorie pure a permis seul certaines applications que l'on n'avait pu jusque-là aborder. Il faut donc apporter dans les vues générales sur la marche de la science une grande largeur d'idées et ceci n'a rien de spécial aux sciences mathématiques; l'esprit souffle où il veut. Peu d'années après que Fourier écrivait les lignes que je viens de rappeler, apparaissait Evariste Galois qui aurait, s'il avait vécu davantage, rétabli l'équilibre en ramenant les recherches vers les régions les plus élevées de la théorie pure; ce fut un malheur irréparable pour la science française que la mort de Galois, dont le génie allait, vingt ans plus tard, exercer une action si profonde sur les parties les plus abstraites des mathématiques.

Parmi les applications de la théorie des équations différentielles, une des plus intéressantes et des plus importantes concerne la géométrie. En France, cette école d'analystes géomètres, pour qui les problèmes de géométrie infinitésimale sont l'occasion de belles recherches analytiques, a pour chef M. Darboux. Ses leçons sur la théorie des surfaces sont un livre classique, qui a rappelé l'attention sur des questions quelque temps négligées. Les recherches de géométrie infinitésimale ont pris un grand essor sous l'influence de ce bel ouvrage ; les travaux de M. Darboux, ceux de MM. Weingarten, Bianchi, Goursat, Guichard, Kœnigs, Raffy et bien d'autres, ont donné une vie

nouvelle à cette partie si importante, depuis Gauss, des sciences mathématiques, et, entre autres, la question de la déformation des surfaces, s'est enrichie de résultats remarquables. Je donnerai une idée de ce genre de recherches, en énonçant un théorème élégant sur les surfaces. On sait que l'inverse du produit des deux rayons de courbure principaux en un point d'une surface s'appelle la courbure de la surface en ce point. La sphère est une surface fermée, sans singularités, à courbure constante positive ; elle est la seule, comme l'a montré M. Liebmann

Nous avons parlé tout à l'heure de l'œuvre de Sophus Lie sur la théorie des groupes de transformations, qui restera certainement un des plus beaux monuments de l'analyse mathématique au XIXe siècle. L'illustre géomètre en avait montré l'importance dans l'étude des équations différentielles, et ses élèves ont continué ce genre de recherches. A un tout autre point de vue, M. Picard, MM. Vessiot et Drach ont tiré parti de la théorie des groupes de transformations pour étendre à l'analyse les notions si fécondes introduites en algèbre par Galois, de telle sorte que de remarquables analogies entre la théorie des équations différentielles et la théorie des équations algébriques ont été mises en évidence.

Je ne puis terminer cette rapide revue touchant les sciences mathématiques sans dire un mot de leur partie la plus abstraite, celle où règne le nombre

pur. Les célèbres recherches de Kummer, de M. Dedekind et de Kronecker sur les nombres algébriques ont été l'origine de travaux extrêmement intéressants publiés surtout en Allemagne. Toute une arithmétique nouvelle a été fondée, où les lois de la divisibilité se présentent d'abord tout autres que dans l'arithmétique usuelle; on y voit des entiers décomposables de plusieurs manières en facteurs premiers, et ce n'est qu'en introduisant la notion des *idéaux* que M. Dedekind a pu retrouver les lois simples auxquelles nous sommes habitués. Citons encore le nom de M. Minkowski qui utilise en arithmétique les conceptions géométriques et vient de rassembler ses profondes recherches dans un livre sur la géométrie des nombres, et les noms de MM. Hilbert, Hurwitz et Frobenius auxquels la théorie des nombres et l'algèbre pure doivent d'importants progrès. Rappelons enfin que M. Lindemann, s'inspirant des profondes recherches d'Hermite sur la transcendance du nombre $e$, a pu établir l'impossibilité de la quadrature du cercle, proposition dont, depuis plus de deux mille ans, on cherchait en vain une demonstration rigoureuse; la démonstration, considérablement simplifiée, peut figurer aujourd'hui dans l'enseignement élémentaire de nos Universités.

## IV

### LA MÉCANIQUE CÉLESTE ET L'ASTRONOMIE PHYSIQUE

Nous obéissons aux habitudes en parlant ici de l'astronomie, science dont une partie a un caractère exclusivement mathématique, et dont l'autre rentre en réalité dans la physique. L'astronomie de position ne nous éloigne pas de la théorie des équations différentielles dont nous parlions tout à l'heure. Une fois posées, les lois de la gravition universelle, c'est-à-dire une fois admis que deux corps, dont les dimensions sont négligeables par rapport à leur distance, s'attirent proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance, et le Soleil et les planètes étant ainsi supposés réduits à des points matériels, la recherche des positions des planètes revient à l'intégration d'un système d'équations différentielles qui s'écrit aisément. Malgré leur apparente simplicité, ces équations présentent d'énormes difficultés et font depuis longtemps l'objet de l'étude approfondie des géomètres et des astronomes. Si des circonstances particulières, comme la grandeur de la masse du Soleil par rapport à celle des planètes, ne s'étaient présentées, les procédés d'intégration par approximations successives employés par les astronomes n'auraient conduit à aucun résultat ; on peut donc se réjouir

de l'heureux hasard auquel nous devons le magnifique épanouissement de la mécanique céleste depuis plus d'un siècle. Il est probable qu'il y a des étoiles multiples où les composants sont de masses à peu près égales ; plaignons leurs habitants, s'il y en a et s'il en est qui cherchent à faire de la mécanique céleste.

Une œuvre magistrale, dont l'auteur a été prématurément enlevé à la science, il y a quelques années, le *Traité de mécanique céleste* de Tisserand, donne un tableau complet de l'état actuel de l'astronomie mathématique. Nous ne pouvons mieux faire que de reproduire les dernières lignes de cet ouvrage, qui résument les progrès de l'astronomie de position au siècle dernier : « La loi de Newton, dit Tisserand, représente en somme, avec une très grande précision, les mouvements de translation des corps célestes. On peut être émerveillé de voir que les inégalités si nombreuses, si compliquées, et quelques-unes considérables du mouvement de la Lune soient représentées, comme elles le sont, par la théorie. Sans doute il reste quelque chose : dans un intervalle de deux siècles et demi environ, la Lune s'écarte peu à peu de la position calculée jusqu'à un maximum de quinze secondes d'arc, de manière que, durant ce long intervalle, le bord éclairé de la Lune passera un peu plus tôt ou un peu plus tard devant les fils d'araignée de la lunette méridienne, sans que l'avance ou le retard dépasse

une seconde de temps. De même les positions des planètes, pendant un siècle et demi d'observations précises, sont représentées à moins de deux secondes d'arc près. Il y a une exception : Mercure peut être en avance ou en retard d'une quantité qui, pour certaines régions de l'orbite, s'élève à huit secondes d'arc, soit un demi-seconde de temps au bout d'un siècle. Les désaccords pour le nœud de Vénus et le périhélie de Mars sont bien moins importants. On éprouve, en fin de compte, une admiration profonde pour le génie de Newton et de ses successeurs et pour les immenses travaux de Le Verrier, poursuivant pendant plus de trente ans son enquête méthodique dans toute l'étendue du système solaire, travaux si habilement continués et développés par M. Newcomb ».

Il nous faut ajouter maintenant que, au point de vue théorique, le mathématicien a lieu d'être moins satisfait que l'astronome, et on peut dire que les équations de la mécanique céleste font son désespoir. Depuis quinze ans, M. Poincaré poursuit sur ce sujet des recherches extrêmement profondes, qu'il a rassemblées dans un ouvrage ayant pour titre : *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste.* Les conclusions les plus importantes ont un caractère négatif. M. Poincaré montre que les séries employées en mécanique céleste ne peuvent être toujours convergentes et qu'on n'en peut rien tirer en toute rigueur pour la position des astres à

très longue échéance ; ceci, bien entendu, n'empêche pas que, pour un temps assez limité, on ne puisse avoir confiance dans les prédictions des calculs habituels, grâce aux heureuses circonstances auxquelles j'ai fait allusion En outre, M. Poincaré établit qu'il n'existe pas d'autres intégrales premières uniformes que celles actuellement connues. Parmi les résultats positifs dus à l'éminent géomètre, citons les solutions périodiques et les solutions asymptotiques dont il a démontré l'existence et qu permettront probablement de modifier le point de départ des méhodes d'approximations suivies aujourd'hui ; des tentatives ont déjà été faites dans ce sens pour le calcul des perturbations de certaines petites planètes. Il est à craindre, néanmoins, que les efforts des analystes ne viennent échouer longtemps encore contre les immenses difficultés d'un problème posé cependant si nettement : les lois de la nature ne sont pas toujours simples pour les calculs des mathématiciens. En présence de ces difficultés, il n'y a certes pas lieu d'être étonné des quelques désaccords que présentent avec l'observation les théories de la Lune et de Mercure ; on peut penser que c'est à notre impuissance analytique et non pas à la loi même de la gravitation universelle qu'il faut attribuer ces légères discordances.

L'astronomie d'observation a fait à la physique des emprunts de plus en plus étendus. La photographie appliquée à l'astronomie est devenue un puis-

sant auxiliaire de l'astronomie de position, en permettant d'entreprendre la carte céleste internationale. La spectroscopie avait, dès sa naissance, trouvé dans le ciel une de ses plus remarquables applications; elle a, depuis, révélé la constitution de presque tous les astres, depuis les comètes jusqu'aux nébuleuses et même, au moyen de la méthode Döppler-Fizeau, dont nous parlerons en physique, décélé la vitesse de leurs mouvements propres. Si la photographie et la spectroscopie ont pu ainsi changer en quelque sorte la face de l'astronomie d'observation, cela est dû, pour une bonne part, aux perfectionnements apportés à la construction des instruments, et en particulier à la puissance des objectifs que l'on emploie aujourd'hui. Il existe maintenant plusieurs lunettes ayant un mètre d'ouverture, et on a vu à l'Exposition de 1900 la grande lunette de soixante mètres dont l'objectif a $1^{m},20$ de diamètre. Un examen rapide des divers corps du système solaire, puis des systèmes beaucoup plus éloignés formés par les étoiles et les nébuleuses, nous montrera les résultats essentiels obtenus en astronomie dans ces dernières années.

Il est indispensable de connaître la forme, les dimensions et les mouvements de la Terre que nous habitons. L'Europe presque tout entière a été couverte de triangles géodésiques. Les Anglais ont triangulé l'Inde, et au Cap ils ont étendu l'arc de La Caille, qu'ils songent à prolonger jusqu'à la Médi-

terranée. La France reprend en ce moment l'arc du Pérou, tandis que des missions russe et suédoise mesurent un arc au Spitzberg. Les mesures relatives à la gravité sont toujours le complément indispensable des opérations géodésiques. Tandis que jusqu'ici on s'est servi presque exclusivement dans ce but du pendule, M. Eotvos a modifié la balance de torsion, en remarquant que la pesanteur aux divers points de cette balance n'est pas la même que celle au centre de gravité autour duquel se font les oscillations, ce qui produit un couple.

Le mouvement de translation de la Terre donne, comme on sait, naissance à ce que l'on appelle l'aberration, d'après laquelle nous ne voyons pas exactement les étoiles à leurs places réelles; la constante si importante de l'aberration n'est pas encore connue avec la précision désirable. Dans le déplacement annuel de la terre autour du Soleil, son axe de rotation ne reste qu'à peu près parallèle à lui-même; ses mouvements correspondent à la précession et à la nutation, phénomènes qui produisent les variations de longitude et de latitude en chaque point de notre globe. Dans ces dernières années, aucun problème astronomique n'a suscité plus de recherches que celui de la variation des latitudes. Le mouvement en spirale du pôle sur la surface terrestre est maintenant établi, et il est hors de doute que dans les variations de latitude résultant des mouvements du pôle, il existe deux termes

périodiques dont l'un, découvert par M. Chandler, est de quatorze mois, l'autre étant d'une année. Il resterait à démêler les causes météorologiques, géologiques ou autres, produisant ce mouvement si complexe.

Les études d'astronomie physique sur le Soleil et la Lune se poursuivent régulièrement. C'est surtout au spectroscope que nous devons nos connaissances sur la constitution physique du Soleil. Ce merveilleux instrument montre que la plupart des corps connus à la surface de la terre existent dans le Soleil à l'état de vapeur, et même, chose singulière, il a révélé dans le Soleil l'existence de l'hélium près de trente ans avant que ce gaz fût découvert parmi les éléments terrestres. Au-dessus de la photosphère, se trouve une enveloppe rose et mince qui l'entoure, la chromosphère. Çà et là, celle-ci s'élève à de grandes hauteurs formant ainsi les flammes qu'on appelle les protubérances. En 1868, MM. Janssen et Loyckyer avaient montré qu'on pouvait les observer en dehors des éclipses ; leur spectre contenant un grand nombre de raies brillantes, a été étudié avec soin, et MM. Hale et Deslandres ont même pu obtenir des photographies des protubérances. En interprétant avec le principe Döppler-Fizeau, les déplacements des raies du spectre des protubérances, on a trouvé que ces flammes sont le siège de mouvements extrêmement rapides. Au-dessus de la chromosphère, se trouve la cou-

ronne, qui forme la dernière et aussi la plus mystérieuse des enveloppes solaires. On l'aperçoit seulement pendant les éclipses totales du Soleil (durant au plus six minutes), sous forme d'auréole à lumière argentée entourant le Soleil et la Lune. La couronne n'étant observable que quelques heures par siècle[1], nos connaissances sur sa nature progressent lentement. Parmi les raies brillantes de son spectre, on remarque surtout une raie verte produite par une matière encore inconnue sur la Terre, le *coronium*. D'après les observations des dernières éclipses, M. Deslandres pense que la partie inférieure de la couronne tourne dans le même sens que le Soleil. Le savant astronome de Meudon a aussi fait l'application toute spéciale du principe de Döppler-Fizeau aux planètes Jupiter et Uranus, la rotation de cette dernière semblant, par ces recherches, être rétrograde.

La portion de la surface de notre satellite, tournée vers la Terre, commence maintenant à être connue avec une grande précision, grâce aux photographies lunaires faites par MM. Lœwy et Puiseux avec le grand équatorial coudé de l'Observatoire de Paris. Un grand nombre de cartes de leur magnifique atlas ont déjà paru, représentant la Lune à l'échelle de un millimètre pour 1,800 mètres. Plusieurs astro-

1. Le rayonnement calorifique de la couronne pourrait cependant, d'après M. Deslandres, servir à la reconnaissance de la couronne en dehors des éclipses totales.

nomes pensent actuellement que la Lune doit avoir une légère atmosphère qui aurait eu autrefois une densité beaucoup plus forte qu'aujourd'hui.

Nous avons vu les difficultés subsistant au point de vue de la théorie de la planète Mercure. Au point de vue physique, sa surface ne présentant jamais que de rares détails difficiles à saisir, on a encore quelques doutes sur la durée de sa rotation autour de son axe. Longtemps la durée admise a été d'environ vingt-quatre heures, mais, d'après les observations récentes de M. Schiaparelli, confirmées par M. Perrotin, elle tournerait sur elle-même dans le même temps qu'elle tourne autour du Soleil, soit quatre-vingt-huit jours. Quoique la planète Vénus soit l'astre le plus brillant du ciel, après le Soleil et la Lune, on sait peu de chose de sa constitution physique, sans doute à cause de son atmosphère épaisse ; la durée de la rotation est regardée par MM. Schiaparelli et Perrotin comme égale à deux cent vingt-cinq jours. Toutefois des observations spectroscopique récentes utilisant la méthode Döppler-Fizeau, annoncées par M. Bélopolsky, tendraient à la ramener à peu près à vingt-quatre heures.

La question des canaux de Mars n'a guère avancé dans ces dernières années. Pour les petites planètes comprises entre Mars et Jupiter, leur nombre s'accroît sans cesse et on les découvre maintenant par la photographie. Le plus intéressant de ces astéroïdes est Éros, qui a été découvert par M. Witt,

à Berlin, en 1898; il présente cette particularité unique de se trouver parfois entre Mars et la Terre, et de passer à une faible distance de celle-ci. On a ainsi un moyen de trouver la distance d'Éros à la Terre, et, par suite, de fixer avec une précision jusqu'ici irréalisable les dimensions du système solaire; une entente internationale s'est établie à ce sujet, entre divers observatoires. Un autre événement astronomique important a été la découverte faite en 1892, par M. Barnard, à l'Observatoire Lick, en Californie, d'un cinquième satellite de Jupiter dont la révolution autour de la planète est d'environ douze heures [1]. En 1898, M. H. Pickering découvrit sur les plaques photographiques un neuvième satellite à la planète Saturne, plus éloigné de la planète que les satellites déjà connus et paraissant avoir une révolution rétrograde; plus récemment encore, M. Pickering signalait sur les plaques photographiques un dixième satellite de Saturne, qui est actuellement le plus faible des astres connus.

Les questions se rattachant aux comètes sont très nombreuses; c'est un des problèmes les plus intéressants à l'ordre du jour, tant au point de vue de l'astronomie de position qu'au point de vue de l'astronomie physique et de la cosmogonie. On a pensé longtemps que les comètes venaient des espaces interstellaires et pénétraient le plus souvent en étrangères dans le système solaire pour en sortir

1. Au commencement de 1904 et de 1905, un sixième et un septième satellite de Jupiter ont été découverts par M. Perrine, à l'observatoire Lick.

ensuite, mais on admet maintenant qu'elles appartiennent au système solaire. La désagrégation des comètes paraît tenir surtout à l'action du Soleil et des planètes, l'action prépondérante étant celle du Soleil qui agit lentement par son attraction et plus énergiquement par sa chaleur. Des comètes aux étoiles filantes, la transition est immédiate. La parenté entre les deux espèces de corps est indéniable, mais, malgré les beaux travaux de M. Schiaparelli, bien des questions restent ouvertes, et la désagrégation des comètes ne suffit probablement pas à expliquer comment la Terre rencontre tant d'essaims d'étoiles filantes.

Si du système solaire, nous passons au monde sidéral, nous voyons se dresser les problèmes les plus grandioses. Il est inutile d'insister sur l'importance de la photographie pour la formation d'une carte céleste et d'un catalogue d'étoiles. Ce travail immense est en excellente voie; le catalogue, qui doit renfermer les coordonnées exactes de deux à trois millions d'étoiles jusqu'à la onzième grandeur, sera même terminé d'ici peu. La carte céleste donnera, avec ses vingt-deux mille clichés les positions de trente millions d'étoiles, avec autant de précision que pourraient le faire les meilleures observations méridiennes. Ce sera un document d'une valeur incomparable pour les recherches futures sur les transformations du monde stellaire.

Un des problèmes les plus captivants de l'astrono-

mie stellaire est la recherche des étoiles doubles ou multiples commencée au début du siècle dernier par le grand observateur anglais W. Herschell. L'étude du mouvement des étoiles doubles ou multiples a révélé en quelque sorte l'unité primordiale qui règne dans l'Univers, car elle a montré que, dans ces systèmes éloignés, la matière obéit aux mêmes lois de l'attraction que dans le système solaire. De plus, on a pu, en observant le dédoublement périodique de certaines raies spectrales, conclure que quelques étoiles, simples sous les plus forts grossissements, étaient doubles et animées d'un mouvement relatif orbital. Enfin, une autre classe d'étoiles doubles est formée par celles qui ont un compagnon presque obscur, dont la présence est révélée par l'irrégularité du mouvement propre de l'étoile principale : tel est le cas de Sirius dont le compagnon, jusque-là introuvable, ne fut aperçu qu'en 1862 et n'est qu'une étoile de dixième grandeur noyée dans la lumière de l'astre principal.

Les recherches des mouvements propres des étoiles demandent de longues et pénibles mesures micrométriques, auxquelles on doit faire subir un nombre considérable de corrections, et qui souvent s'étendent sur une période de dix à vingt années. Il arrive quelquefois de rencontrer des personnes se demandant à quoi les astronomes peuvent bien employer leur temps dans les observatoires ; on comprend, d'après ces chiffres, quels labeurs et

quelle patience demandent les travaux de longue haleine auxquels nous venons de faire allusion.

La mesure des distances de certaines étoiles au soleil est un des résultats les plus frappants de l'astronomie. On connaît maintenant avec certitude, à quelques centièmes de seconde près, une cinquantaine de parallaxes. Pour les étoiles doubles, dont on connaît la parallaxe en même temps que les éléments de l'orbite, il est possible de mesurer la somme des masses des deux étoiles au moyen de la troisième loi de Kepler ; d'autre part le rapport des dimensions des orbites autour du centre de gravité donne le rapport inverse des masses. Il est bien remarquable que les masses des étoiles qui ont pu être déterminées sont du même ordre que la masse du soleil. Ainsi l'étoile double la plus rapprochée de la terre, $\alpha$ du Centaure, pour laquelle la lumière ne met que quatre ans et demi à nous arriver à raison de trois cent mille kilomètres par seconde, a une masse double environ de celle du soleil, et la masse de chacune des deux étoiles du système est à peu près celle du soleil ; elles tournent en quatre-vingt-un ans autour de leur centre de gravité commun.

Mentionnons enfin les nébuleuses non résolubles dont on fixe aujourd'hui, avec la plus haute précision possible, la position actuelle dans le ciel. Le nombre des nébuleuses connues a considérablement augmenté, particulièrement par suite des belles observations faites dans ces dernières années par

M. Bigourdan. Leur intérêt tient surtout au rôle capital que ces astres jouent dans les théories cosmogoniques, chaque nébuleuse non résoluble paraissant constituer un monde stellaire en formation. On en connaît aujourd'hui plus de dix mille et toutes les observations tendent à confirmer les vues grandioses d'Herschell, à savoir que seules, parmi les objets célestes, les nébuleuses non résolubles sont étrangères à notre voie lactée : ce sont d'autres voies lactées perdues dans l'espace à des distances immenses de la nôtre et dont nous ne pouvons nous faire aucune idée. Toutes les étoiles proprement dites appartiennent à ce que nous appelons la voie lactée, notre soleil et les étoiles visibles à l'œil nu ne formant qu'un petit amas local engagé dans l'intérieur de celle-ci.

# CHAPITRE III

## Mécanique et Énergétique.

I. La Mécanique classique et son histoire. — II. Des méthodes déductives en mécanique. La mécanique de Hertz. — III. De l'explication mécanique des phénomènes naturels. — IV. La science de l'énergie.

---

### I

#### LA MÉCANIQUE CLASSIQUE ET SON HISTOIRE

Les principes de la mécanique ont fait depuis trente ans l'objet de nombreuses études. Il avait semblé pendant longtemps qu'ils étaient au-dessus de toute critique, et l'œuvre des fondateurs de la science du mouvement formait un bloc que l'on croyait devoir défier à jamais le temps. Une analyse pénétrante a examiné à la loupe les fondations de l'édifice ; en fait, là où nos prédécesseurs trouvaient ou paraissaient trouver toutes choses simples, nous rencontrons aujourd'hui de sérieuses difficultés. Beaucoup de ceux qui ont eu à enseigner les débuts

de la mécanique ont été troublés par l'incohérence de certaines expositions traditionnelles. Ils ont trouvé arbitraire cet alliage de démonstrations mathématiques et de principes expérimentaux, et ont aperçu nombre de cercles vicieux. Peut-être y a-t-il dans ces critiques quelques exagérations, car ce n'est pas un paradoxe de soutenir qu'il y a des cercles vicieux au début de toute science, et que sans eux aucune science ne se serait développée. A parler franc, on peut se demander si une exposition bien cohérente est possible dans un premier enseignement de la mécanique. En cette matière, les expositions didactiques et bien ordonnées, comme les aime trop quelquefois l'enseignement français, valent seulement pour ceux qui savent déjà, et l'on commence à se convaincre que les difficultés signalées s'atténuent si on se place au point de vue historique.

L'enseignement élémentaire de la mécanique gagnerait beaucoup à rester moins étranger à ce point de vue. On comprend mieux le mélange de postulats et d'expériences plus ou moins précises, qui ont conduit aux principes généraux, quand on suit dans ses grandes lignes la marche historique de la science. Qu'on n'aille pas prétendre que cela est inutile ; en géométrie, dira-t-on, on ne commence pas par décrire les observations et les expériences faites par nos lointains ancêtres et par analyser le travail mental qui a été ensuite l'origine des postulats de la géométrie. C'est que dans la science de

l'espace, probablement sous l'influence d'une longue hérédité, nos conceptions géométriques ont pris un caractère intuitif. Il n'en est pas de même en mécanique, où, les choses étant autrement complexes, quelques principes généraux n'ont pu être dégagés qu'avec une extrême lenteur, et où le retard est énorme par rapport à la géométrie. On ne peut donc douter qu'il y ait grand intérêt pour le débutant à suivre, dans leurs grandes lignes et avec les simplifications nécessaires, le développement des idées des fondateurs de la Statique et de la Dynamique. C'est une erreur de croire qu'il faudrait beaucoup de temps pour un tel enseignement, dont le professeur pourrait tirer en outre des leçons d'une haute portée.

Il vaut la peine d'insister un peu sur cette question. La critique est toujours nécessaire, mais c'est à tort que l'on s'est trop méfié de ces connaissances instinctives qui sont souvent le résumé d'une longue série d'expériences. Ce sont elles qui, en statique, où de très bonne heure l'homme a eu une juste intuition des choses, ont permis de poser les premières bases de la science, et qui, convenablement interprétées, ont conduit à quelques principes généraux. En se plaçant au point de vue plus souple de l'histoire, on n'a pas à craindre d'introduire dans la science une sorte de rigueur fausse et absurde, et de donner à l'exposition une forme rigide et scolastique. Ainsi, prenons le principe des vitesses virtuelles avec la démonstration de Lagrange, où les

forces sont remplacées par des fils de mêmes directions qu'elles passant sur des poulies et tendus par des poids. On utilise dans cette démonstration une connaissance instinctive relative à l'abaissement du centre de gravité. C'est un semblant de preuve, mais combien lumineux.

Plus importante encore est l'histoire du développement des principes de la dynamique. Celle-ci est une science toute moderne. Toutes les spéculations mécaniques des anciens, des Grecs en particulier, se rapportent à la statique. Galilée, Huyghens et Newton sont les trois fondateurs de la science du mouvement. Galilée fonde la mécanique du mouvement d'un point matériel dans un champ constant, et il est très intéressant de suivre les hypothèses successives faites par le grand physicien, avant d'arriver aux expériences sur le plan incliné[1]. « Galilée, dit avec raison M. Mach, possède l'esprit moderne : il ne se demande pas *pourquoi* les corps tombent, mais *comment* ils tombent, c'est-à-dire d'après quelles lois se meut un corps tombant librement. Pour déterminer ces lois, il fait certaines hypothèses ; mais, au contraire d'Aristote, il ne se borne pas à les poser, il cherche à en prouver l'existence par l'expérience ». Galilée ne s'occupe d'ail-

1. Parmi les ouvrages relatifs à l'histoire de la mécanique, le livre de M. Mach, professeur à l'Université de Vienne, est depuis longtemps classique en Allemagne; il vient d'être traduit en français.

leurs que d'un seul point, et ne fait pas de distinction entre la *masse* et le *poids*. Il est curieux de voir comment Galilée arrive incidemment à la loi de l'inertie dans un cas très particulier ; c'est, pour lui, un cas limite du mouvement d'un point lancé sur un plan incliné, quand celui-ci devient horizontal. La grande gloire de Galilée est d'avoir discerné, dans les phénomènes naturels, le fait que les circonstances déterminantes du mouvement produisent des accélérations. La loi de l'inertie d'ailleurs en résulte, et il n'y a pas lieu d'en donner un énoncé spécial, quand on se place à ce point de vue. Bien fécondes aussi furent, par leurs conséquences, les remarques de Galilée envisageant le mouvement d'un projectile comme un phénomène composé de deux mouvements *indépendants* l'un de l'autre.

Le rôle de Huyghens a été ainsi résumé par M. Mach : « Parmi les successeurs de Galilée, on doit considérer Huyghens comme son égal à tous égards. Peut-être avait-il l'esprit moins philosophique, mais il compensait cette infériorité par son génie de géomètre. Non seulement Huyghens poussa plus loin les recherches commencées par Galilée, mais il résolut l'un des premiers problèmes de la *dynamique de plusieurs masses*, alors que Galilée s'était toujours limité à la dynamique *d'un seul* corps ». Avec Huyghens aussi, nous passons aux forces variables; ses recherches sur la force centrifuge ont joué un rôle capital dans le développe-

ment de la mécanique. La notion de masse, il faut le dire, est bien confuse pour lui, mais il n'en traite pas moins un problème alors extrêmement difficile, le problème du pendule composé, c'est-à-dire d'un corps solide pesant mobile autour d'un axe horizontal, en utilisant un postulat *instinctif*, relatif au mouvement du centre de gravité d'un système pesant, et qui revient au fond au théorème des forces vives.

Newton constitue définitivement la dynamique. Il généralise le concept de force, et, quoiqu'il regarde d'une manière peu heureuse la masse comme étant la quantité de matière, il sent le premier avec netteté qu'il y a dans chaque point matériel une constante caractéristique du mouvement différente de son poids : *c'est la masse.* L'introduction de la notion de masse a toujours préoccupé ceux qui ont écrit sur la dynamique. Pour nombre d'auteurs, elle repose sur le principe suivant posé *a priori :* Deux corps, dont la dimension est négligeable par rapport à la distance, se communiquent des accélérations respectives, toujours opposées l'une à l'autre, et dont le rapport est fixe, c'est-à-dire toujours le même pour les deux corps; le rapport des masses pour ceux-ci est égal à la valeur absolue du rapport des accélérations. Il faut d'ailleurs poser de plus en principe que, si les masses des deux corps sont évaluées par rapport à un troisième, le rapport de ces masses concordera avec ce qu'aurait donné l'ac-

tion des deux corps l'un sur l'autre. On doit ajouter ce second principe, car il n'y a pas dans cette question physique de nécessité *logique* à ce que deux masses égales à une troisième soient égales entre elles. Quand on définit les masses comme il vient d'être dit, il est clair qu'il est inutile de postuler à part le principe dit de *l'égalité de l'action à la réaction;* ce serait énoncer deux fois le même fait. Ce point de vue est irréprochable, mais il faut avouer que, par son apparence astronomique, il est déjà complexe pour le débutant. J'avoue, pour un premier enseignement, préférer un autre mode d'exposition qui se rapproche davantage de l'ordre historique, le concept de masse s'étant, semble-t-il, introduit pour la première fois quand on remarqua que la pesanteur peut imprimer à un même corps des accélérations différentes, comme il fut reconnu par les observations du pendule de Richer. Il suffit de joindre à ce premier fait les expériences classiques de Newton sur des pendules formés de matières diverses. On passe ensuite aux forces variables par le procédé limite habituel aux mathématiques, et l'on obtient alors l'équation fondamentale de la dynamique du point matériel.

Newton, dans ses *Principes*, admettait l'existence d'un temps absolu et d'un espace absolu. Cette intrusion, presque métaphysique, déplaît grandement aujourd'hui à certains esprits, l'espace absolu et le mouvement absolu étant des notions purement

abstraites. Cependant, je ne vois aucun inconvénient à postuler, au début de la mécanique, l'existence d'un corps absolument fixe, que l'on appellera, si l'on veut, le corps $\alpha$ avec C. Neumann, et à faire appel à une horloge purement idéale. La science s'est dévéloppée avec ces intuitions plus ou moins conscientes; je ne suis d'ailleurs pas sûr que l'on puisse penser à des mouvements relatifs sans avoir l'idée de mouvements absolus. C'est seulement, à mon avis, après avoir posé les équations de la mécanique, que l'on s'étendra sur le caractère approché des expériences de Galilée et Newton, et que l'on précisera les systèmes de comparaison. Quant aux soi-disant cercles vicieux d'une telle exposition, nous nous sommes expliqué plus haut à leur sujet; ce sont simplement des approximations successives.

L'équation fondamentale de la mécanique classique consiste en ce que la force est égale au produit de la masse par l'accélération. Il semble, au premier abord, que cette égalité *définit* tout simplement la force, et l'on peut se demander alors quel intérêt elle présente. Elle n'est en effet utile pour renseigner sur le mouvement du point matériel et permettre *de prédire* ce mouvement, que si l'on connaît la force *autrement que par cette égalité même.* C'est là un point capital, que fixeront quelques exemples simples. Supposons en premier lieu que nous ayons affaire à un champ de forces où la force puisse être mesurée statiquement et se trouve être une

fonction connue des coordonnées du point; l'égalité considérée donne alors un système d'équations différentielles dont l'intégration, pour des conditions initiales données, nous donnera le mouvement. Il pourra encore arriver que l'on se trouve dans un champ dans lequel on ait observé des mouvements particuliers, et que pour ceux-ci la force, déduite de l'égalité fondamentale, puisse être mise sous la forme d'une fonction déterminée de la position du point. Si l'on admet qu'il en est encore ainsi pour tous les mouvements se produisant dans le champ, nous serons en mesure de prédire, par intégration, les mouvements dans tous les cas. C'est ainsi que Newton, partant du mouvement des planètes satisfaisant aux lois de Kepler, a été conduit à la loi de gravitation universelle. Bien d'autres circonstances peuvent encore se présenter; il peut y avoir des liaisons, et ce sera à l'expérience ou à l'observation à donner quelques renseignements sur ces liaisons, mais j'en ai dit assez pour montrer la véritable signification de l'équation fondamentale de la dynamique du point matériel.

Après la période d'induction, qui est l'âge héroïque de la dynamique, période dont nous venons de rappeler à grands traits l'histoire, est venu le moment où on s'est efforcé de donner aux principes une forme définitive et où le développement mathématique a joué un rôle essentiel. C'est ici que les mathématiques sont indispensables, permettant de

réaliser cette moindre dépense intellectuelle, qui donne à la science un caractère *économique*. J'ai insisté sur ces points dans le premier chapitre (§ II, page 22) et parlé à ce propos du rôle fondamental des équations, auxquelles restera à jamais attaché le nom de Lagrange.

## II

### DES MÉTHODES DÉDUCTIVES EN MÉCANIQUE. — LA MÉCANIQUE DE HERTZ

Nous venons de nous placer au point de vue historique auquel il me paraît nécessaire de recourir dans une première étude de la mécanique, sans trop se laisser effrayer par certaines incohérences et certains soi-disant cercles vicieux. Cependant beaucoup de bons esprits sont aujourd'hui effrayés de ces expositions trop souvent imprégnées du dualisme entre force et matière qui s'était introduit dans la mécanique classique, où la force paraît être un agent particulier qui est la cause du mouvement de la matière. Aussi d'illustres physiciens ont-ils voulu rompre avec les anciennes habitudes. Abandonnant complètement le point de vue historique du développement de la science, ils se placent à un point de vue analogue à celui du géomètre qui construit une géométrie en partant d'un certain nombre d'axiomes; leur méthode est ainsi toute *déductive*. Une telle manière de procéder a ses avantages et ses inconvénients. Les avantages sont que le système est bien

enchaîné; on construit ainsi de toutes pièces et *a priori* un ensemble de représentations, et l'on en tire toutes les conséquences possibles. C'est seulement quand l'exposition du système est complète que l'on compare les résultats avec l'expérience. Cette façon de procéder est évidemment très philosophique; elle avoue, en quelque sorte, nettement dès le début, que le seul but de la science est de chercher un système d'images que nous faisons correspondre à la réalité et qui permettent, dans certains cas, de prévoir cette réalité sans avoir la prétention de l'atteindre effectivement. On comprend, de plus, immédiatement que ce système d'images ne soit pas nécessairement unique et qu'on puisse en adopter plusieurs. Mais ici nous touchons en même temps aux inconvénients de cette voie déductive, particulièrement comme méthode d'enseignement; elle ne montre pas comment on a été conduit à échafauder la construction, et en cela ne satisfait pas l'esprit. La même difficulté ne se présentait évidemment pas pour la géométrie, où les postulats ont un caractère beaucoup plus intuitif et se rapportent à l'expérience vulgaire, comme j'ai déjà eu l'occasion de le remarquer.

Un type de construction de la mécanique à la manière déductive nous est offert par les leçons de M. Boltzmann sur les principes de la mécanique; les idées de M. Boltzmann sont d'ailleurs celles de Saint-Venant et de M. Boussinesq. On

pose l'existence d'un certain nombre de points matériels, et une série de postulats sur le mouvement de ces points est formulée. L'accélération de chaque point est la somme de $n - 1$ accélérations partielles dirigées suivant les droites joignant le point considéré aux $n - 1$ autres. De plus, ces accélérations partielles, quand on considère les différents points, sont deux à deux de sens contraires et dans un rapport constant, et un système unique de rapports peut être adopté pour les différents points; enfin, elles dépendent simplement de la distance des deux points correspondants.

On voit qu'avec un tel système de postulats, qu'on pourrait même élargir quelque peu, l'introduction des notions de masse et de force ne présente aucune difficulté. Un système d'équations différentielles d'une forme déterminée se trouve établi. Il y entre diverses fonctions arbitraires, on aura à voir si, pour telles catégories de phénomènes, on peut les choisir de façon que les faits concordent avec ces équations différentielles et que l'on puisse prédire les mouvements correspondant à certaines données initiales. S'il en est ainsi, on est en possession du système d'images dont je parlais plus haut; on a tout ce que l'on doit chercher dans l'explication mécanique des phénomènes, comme le demandait Kirchoff.

Un autre type de construction de la mécanique à la manière déductive nous est donné par le traité

de Hertz. Le grand physicien, enlevé si tôt à la science, après ses immortelles découvertes sur la propagation des ondes électro-magnétiques, consacra la dernière année de sa vie à rassembler ses vues sur la mécanique. Le système de Hertz rompt beaucoup plus avec les habitudes traditionnelles que le système précédent. Quelques notions purement cinématiques doivent d'abord être rappelées. Considérant un système de points affectés de certains coefficients qui deviendront plus tard les masses, il est aisé de définir ce qu'on entend par *longueur* d'un déplacement élémentaire de ce système de points, ainsi que par *direction* et par *courbure* de ce déplacement. Il peut y avoir certaines liaisons entre les points du système; quand elles sont indépendantes du temps et qu'elles concernent seulement les positions relatives des différents points, on dit que le système est *libre*. Appelons encore, avec Hertz, déplacement élémentaire *le plus droit*, un déplacement qui a une courbure moindre que tout autre déplacement élémentaire possible de même direction, et désignons enfin par chemin *le plus droit*, un chemin dont tous les éléments sont les plus droits.

Avec ces définitions nous pouvons énoncer le postulat fondamental sur lequel est basée toute la mécanique de Hertz : *un système libre demeure en repos ou décrit d'une manière uniforme une trajectoire qui est un chemin le plus droit.* On pourrait encore donner une autre forme à ce principe en disant que,

dans le mouvement réel, la somme des accélérations des points du système multipliés par leurs masses est à chaque instant minima parmi tous les mouvements possibles répondant à la même position et aux mêmes vitesses, et ceci rappelle un théorème célèbre de Gauss.

Pour Hertz, tout système dans la nature est un système libre ou une portion d'un système libre auquel on peut appliquer le principe fondamental. Il y a cependant des systèmes qui nous paraissent libres et auxquels ne s'applique certainement pas le principe; cela tient, répond Hertz, à ce que, outre les mouvements visibles, il y a des mouvements cachés et que les systèmes visibles sont liés à des systèmes cachés, de telle sorte que l'ensemble du système visible et du système caché forme réellement un système libre. La nécessité, dans certains cas, de l'introduction de masses cachées paraît d'abord singulière ; en réalité, cette introduction est très familière au physicien. L'éther, qui joue un si grand rôle en physique, est une masse cachée, et certains mouvements vibratoires de la matière pondérable sont eux-mêmes des mouvements cachés.

On comprend, toutefois, que l'indétermination qui subsiste dans l'introduction des masses cachées doive rendre singulièrement difficile l'application des idées de Hertz, même dans des cas très simples. C'est là un grave reproche, mais si l'on passe outre, on ne peut qu'admirer la belle construction du grand

physicien ; elle est largement suggestive et *constitue un vaste programme* pour la mécanique et la physique de l'avenir. On ne doit pas s'étonner que la force ne joue dans tout cela aucun rôle ; il n'en peut être autrement dans la méthode déductive où les lois seules du mouvement sont posées. La force ne pourra apparaître que comme une certaine expression analytique. C'est ce qui arrive quand on considère un système libre que l'on décompose en deux parties ; on est alors conduit à envisager l'action d'une des parties sur l'autre, et inversement. On obtient ainsi des actions et réactions directement opposées. Ceci rappelle le postulat classique de Newton sur l'égalité de l'action et de la réaction, mais il importe de remarquer que la loi affirmée par Newton a un caractère plus général que celle qui se déduit des principes de Hertz. Une comparaison un peu grossière et qui n'est pas entièrement exacte fera suffisamment comprendre ce point. Les seules forces pour Hertz sont, en quelque sorte, des actions de contact ; il n'y a donc dans sa mécanique que des actions et réactions appliquées aux mêmes points. Quand Newton, au contraire, considère l'action et la réaction du Soleil et d'une planète, les deux forces sont appliquées à deux points différents. La mécanique du physicien de Bonn ne connaît pas de telles forces, et ses principes ne pourraient s'appliquer a ce cas que si quelque hypothèse était faite sur la nature de la liaison entre les deux astres. D'ailleurs

le principe de Newton, sous sa forme absolument générale, n'est rien moins que clair, et son interprétation présente plus d'une difficulté dans des exemples touchant le magnétisme, l'électricité et l'optique (voir page 147).

Le principe de la conservation de l'énergie définie comme la somme des produits des masses par les carrés des vitesses est, pour les systèmes libres, une conséquence immédiate du postulat fondamental de Hertz, et on le retrouve aussi sous sa forme habituelle pour une portion d'un système libre regardée comme soumise à certaines forces. Hertz fait une étude approfondie des mouvements cycliques et des mouvements conservatifs, en s'inspirant des recherches antérieures de Helmholtz. Considérons un système formé de masses visibles et de masses cachées, sous la condition que ces dernières forment ce que Hertz appelle un système cyclique adiabatique, le système primitif est dit conservatif. On sait que l'on distingue souvent l'énergie cinétique et l'énergie potentielle; pour un système conservatif, l'énergie cinétique est l'énergie définie comme plus haut des masses visibles, et l'énergie potentielle n'est autre chose que l'énergie des masses cachées. Ces deux énergies ne sont pas de natures différentes; la distinction au fond est factice et dépend du degré de notre connaissance. On voit combien sont intéressantes les spéculations de Hertz; ces vues générales peuvent être regardées comme définissant ce qu'on

doit entendre par une explication mécanique. Quant à la question de savoir si tout phénomène est susceptible d'une explication mécanique, j'y reviendrai tout à l'heure.

Les modes d'exposition déductifs, qu'ils se présentent sous une forme ou sous une autre, sont d'abord très séduisants. Ils condensent, en quelques postulats que l'on formule au début, les résultats auxquels a conduit la succession d'efforts et de tâtonnements des créateurs de la science du mouvement. Ces postulats ont un caractère extrêmement général, et l'on renvoie à l'expérience pour vérifier leurs conséquences plus ou moins lointaines. Mais des difficultés d'une autre nature se présentent, et les postulats fondamentaux placés au début paraissent singuliers à ceux devant qui on les énonce pour la première fois. Je ne sais ce que réserve l'avenir; la science entrera peut-être dans des voies que nous ne pouvons prévoir; mais il y a lieu d'espérer que l'étude des principes, qui tient aujourd'hui tant de place, aboutira à quelques résultats importants. Quelques-uns pensent que le premier chapitre de la dynamique, telle que nous la construisons actuellement, je veux dire la dynamique du point matériel, devra problablement disparaître. La chose assurément est possible, mais je ne la crois pas très prochaine ; car les hypothèses atomiques jouent encore et joueront peut-être toujours un rôle prépondérant dans maintes parties de la science et elles reprennent aujourd'hui une vita-

lité toute nouvelle. Plusieurs points de vue très différents peuvent d'ailleurs être conservés simultanément. Nous nous en rendrons bientôt compte en examinant les diverses tendances de la physique générale à notre époque.

## III

### DE L'EXPLICATION MÉCANIQUE DES PHÉNOMÈNES NATURELS

C'était une idée chère aux cartésiens que toutes les transformations du monde physique se font d'après les lois de la mécanique. Quel est le sens exact de cette assertion, si toutefois elle en a un? La réponse n'est pas facile. Que doit-on entendre par explication mécanique d'un phénomène? Pour Hertz, un phénomène offert par un système sera susceptible d'explication mécanique, si le système fait partie d'un système libre convenablement choisi, et si son mouvement peut être déduit des postulats fondamentaux indiqués plus haut. Helmholtz et M. Poincaré adoptent une forme un peu différente ; ils se reportent au système classique des équations de Lagrange en mécanique rationnelle, auxquelles j'ai déjà fait allusion. Ce système comprend des fonctions indéterminées des paramètres et de leurs dérivées ; si on peut choisir ces fonctions de façon que les équations différentielles de Lagrange correspondent alors aux mouvements du système, il y aura pour ces

mouvements une explication mécanique. De telles réponses restent bien abstraites et bien vagues si on ne les précise quelque peu ; en fait, il est impossible d'obtenir des fonctions déterminées et de former par suite des équations différentielles, si une succession d'inductions, reposant sur des généralisations plus ou moins plausibles d'expériences simples, ne vient apporter des renseignements indispensables. Dans quelle mesure maintenant est-il exact de dire, comme on l'a fait quelquefois, qu'une explication mécanique n'est autre chose qu'un système d'équations différentielles? On peut, une fois celui-ci obtenu, rejeter l'échafaudage qui a servi à former le système et chercher à tirer de ce système avec des ressources de l'analyse mathématique, la coordination des faits connus et à faire des prévisions qui *sont le but suprême de la théorie et la marque de la fécondité.* Mais il arrive maintes fois que quelque fait nouveau vient montrer l'insuffisance de l'explication adoptée ; il faut alors compléter par l'addition de quelque terme les relations différentielles, et il est le plus souvent nécessaire d'inspecter de nouveau l'échafaudage primitif pour pouvoir faire utilement les corrections dans la construction définitive. Si donc on peut accorder que la forme dernière d'une théorie consiste dans un système d'équations différentielles, il est indispensable de ne pas oublier, cependant, les idées qui ont servi à le former.

Revenons à la question : *Tout phénomène est-il*

*susceptible d'une explication mécanique?* Pour une question posée d'une manière si générale, tout dépend des éléments que l'on veut faire intervenir dans la réponse. Par exemple, on aura une explication mécanique de la lumière, si on postule un éther hypothétique. Ayant ainsi fait intervenir ce système *caché* (au sens de Helmholtz et de Hertz) on forme les équations différentielles de son mouvement vibratoire, et l'on a une explication mécanique des phénomènes lumineux. On comprend que, ayant la possibilité de faire intervenir des systèmes cachés doués de propriétés plus ou moins variées il soit souvent possible de fournir des explications mécaniques d'une catégorie de phénomènes. Quelques-uns pourront penser que ces systèmes cachés sont de mauvaises plaisanteries. *A priori,* ils ont raison, mais en fait ils ont tort. Le point capital est d'arriver à des relations entre les quantités mesurables, permettant de prévoir les phénomènes; les quantités inaccessibles sont des variables auxiliaires, que l'on cherche ensuite à éliminer. Maintes théories rentrent aujourd'hui dans ce type général.

Un exemple intéressant est fourni par l'étude des phénomènes calorifiques. L'explication mécanique, au sens que nous venons de dire, du principe de Carnot, présente, de grandes difficultés. Clausius, le premier, a essayé une telle explication, et ensuite Helmholtz, dans ses mémorables recherches sur le principe de la moindre action, pensait y avoir réussi;

depuis lui, M. Boltzmann a cherché à lever certaines objections faites à Helmholtz. L'idée essentielle d'Helmholtz consiste dans l'hypothèse de mouvements cachés. Les variables, d'après lui, peuvent être partagées en deux catégories : les unes nous sont accessibles, les autres nous sont inconnues et correspondent à des mouvements cachés. En faisant certaines hypothèses, on arrive, pour les variables *accessibles*, à des relations différentielles d'une tout autre forme que les équations de la mécanique classique, et c'est ainsi qu'on peut rendre compte de la dissipation de l'énergie. M. Boltzmann, qui a serré la question de beaucoup plus près qu'Helmholtz. fait une distinction entre les mouvements ordonnés et les mouvements non ordonnés ; pour lui, l'augmentation de l'entropie correspond à l'accroissement des mouvements non ordonnés par rapport aux mouvements ordonnés. Nous reviendrons plus loin sur cette question si importante du principe de Carnot.

Nous venons de nous placer à un point de vue analytique et abstrait ; en restant dans le même ordre d'idées, on peut donner quelquefois une forme plus concrète à ces considérations sur l'explication mécanique des phénomènes. Supposons que deux phénomènes différents conduisent au même système de relations différentielles ; ils sont alors les modèles l'un de l'autre, et pour une même catégorie de phénomènes, il peut y avoir plusieurs

modèles. Remarquons d'une manière générale que les images que nous nous formons des choses sont des modèles de ces choses ; ainsi, dans un système où il y a des masses cachées, c'est-à-dire inaccessibles à l'observation, nous ne pouvons faire autre chose que de créer pour lui des modèles sans pouvoir atteindre effectivement la réalité. L'accord entre l'esprit et la nature est, dans cet ordre d'idées, comparable à l'accord entre deux systèmes qui sont modèles l'un de l'autre.

Il semble alors que chacun soit libre de chercher des modèles différents. Il est bien vrai, en raison même de l'indétermination du problème, que les modèles peuvent être variés dans une certaine mesure ; mais l'histoire de la science montre, cependant, que cette variété est très limitée. Il faut, en effet, que nos représentations soient *simples*, et, en restant dans le mécanisme pur, nous avons une tendance à revenir toujours à ces conceptions atomiques et moléculaires qui ont joué un rôle fondamental dans la physique au XIXe siècle. Sans vouloir faire l'histoire complète des idées dans cette question des représentations mécaniques, il me faut dire ici quelques mots d'une représentation très spéciale, chère à l'école anglaise, où le modèle est construit avec les mécanismes les plus usuels. Maxwell a construit d'ingénieux appareils où se manifestent diverses analogies avec les phénomènes électriques et où, par exemple, l'induction apparaît comme due

à l'inertie de certaines masses. Lord Kelvin, surtout, a été très loin dans cette voie, et il a même écrit qu'il n'était satisfait que quand il avait pu faire un modèle mécanique; c'est ainsi qu'avec des solides rigides il réalise des effets élastiques, grâce à des mouvements de rotation, et arrive à effectuer des représentations de l'éther. L'extrême complication de plusieurs de ces modèles, où on voit figurer des gyroscopes et des renvois de sonnettes, choque les esprits habitués à voir les choses d'un point de vue analytique. Il est clair que, si l'on avait la prétention de saisir ainsi la réalité, il y aurait là quelque chose d'étrange. Du moment qu'il ne s'agit que d'images, il n'y a pas à s'étonner que les avis diffèrent sur le degré de simplicité de telle ou telle représentation; les renvois de sonnette de Lord Kelvin ont leur philosophie.

En retraçant sommairement l'histoire de la dynamique classique, nous avons dit (pages 19 et 43) qu'on avait été amené à postuler que les changements infiniment petits, qui surviennent dans un système de corps, dépendent uniquement de son état statique actuel. Ce postulat a pu être appelé, avons-nous dit, principe de *non hérédité*, puisqu'il pose que l'avenir du système dépend seulement de son état actuel; il est à la base de la mécanique rationnelle classique. Des exceptions, au moins apparentes, à ce principe sont cependant nombreuses. Dans celles-ci rentrent les phénomènes où il y a frottement; les accéléra-

tions paraissent là dépendre tout au moins de la vitesse. Mais il se peut que les forces, dites de frottement, ne soient que des forces apparentes, et que l'introduction d'un plus grand nombre de variables, par exemple d'éléments relatifs à la déformation des corps en contact, permette de donner aux équations une forme rentrant dans le type classique. On voit que la question est de même nature que celle dont nous parlions, il y a un moment : les contradictions qu'on croit apercevoir avec le principe fondamental proviendraient de ce que l'élimination de variables *cachées*, pour ne plus garder que des variables *accessibles*, a changé la forme des relations.

C'est encore une question du même ordre que de savoir si les systèmes naturels sont conservatifs, c'est-à-dire si les forces intérieures y admettent un potentiel dépendant uniquement des positions relatives de leurs diverses parties. La grande majorité des physiciens est d'avis que les systèmes *irréversibles* ne peuvent être *conservatifs*; pour discuter cette assertion, il faudrait s'entendre sur la notion d'irréversibilité qui n'est pas indépendante du nombre et de la nature des variables que l'on envisage dans un système. Un physicien et mécanicien d'une grande pénétration, M. Brillouin, pense que la mécanique rationnelle n'est pas essentiellement réversible, et que l'irréversibilité peut s'y introduire avec l'instabilité.

Tout cela est bien bizarre, pensera plus d'un lecteur voyant s'obscurcir l'idée qu'il croyait peut-être avoir très nette de ce qu'est *une explication mécanique*. Mais nous ne sommes pas au bout des difficultés. Pour tenir compte, avec les variables observables, des phénomènes du type de la viscosité et du frottement, on introduit dans les équations des termes avec des dérivées premières dont la forme est, bien entendu, indiquée par des expériences plus ou moins satisfaisantes (comme le sont, pour prendre un exemple simple, les lois de Coulomb). Ces modifications ne sont encore rien ; nous avons ainsi l'état ultérieur du système dépendant en quelque sorte seulement de l'état à un certain instant et à l'instant infiniment voisin (dérivées premières). Que serait une mécanique, où l'hérédité serait complète? ce ne sont plus des équations différentielles qui exprimeraient les lois des phénomènes. On y rencontrerait, à prendre la question dans toute sa généralité, des équations *fonctionnelles*, où les fonctions cherchées seraient engagées sous des signes d'intégrales représentant l'apport de tous les temps antérieurs. Le mot d'hérédité ne doit pas d'ailleurs faire penser nécessairement aux êtres vivants; il signifie simplement ici l'histoire antérieure du système étudié. Le type en est dans les déformations dites permanentes et dans les phénomènes dits d'*hysteresis*. Ici encore on doit se souvenir de la remarque faite tout à l'heure sur les systèmes avec frottements. Peut-être, disions-

nous, les forces dites de frottement ne sont qu'apparentes; nous pourrions dire maintenant : peut-être l'hérédité n'est-elle qu'apparente, et tient-elle à ce que nous ne portons notre attention que sur un trop petit nombre de variables.

Que conclure de tout ce qui précède? C'est que, pris en un sens tout à fait général, le mot d'*explication mécanique* est vide de sens. Mais, dans des catégories étendues de phénomènes, en portant son attention sur des variables bien précisées, dont le rôle est regardé comme prépondérant, on pourra former entre ces variables des relations fonctionnelles (en général équations différentielles), se rapprochant *le plus possible* de ce qu'exigent les postulats fondamentaux de la mécanique rationnelle, relations dont la forme particulière est fournie par des expériences ou observations simples, et qui permettront de prédire dans des cas plus complexes l'état futur du système. Quand il en est ainsi, on dit qu'on a une explication mécanique de ces phénomènes.

Dans le cahot où se trouvent aujourd'hui les notions fondamentales de la mécanique, un seul point semble rallier tous les suffrages : ces équations de la mécanique seront obtenues en égalant à zéro la *variation* d'une certaine intégrale. Il subsistera un principe de *la moindre action*. Ce vieux principe, d'allure théologique, est notre dernier retranchement. Comme l'ont montré récemment MM. Cosserat, en prenant pour un point matériel une *action*

qui soit une fonction quelconque de la vitesse, on obtient une mécanique où la masse dépend de la vitesse; ceci, d'ailleurs, n'avait pas autrefois échappé à Laplace.

## IV

### LA SCIENCE DE L'ÉNERGIE

Nous venons de voir les difficultés que l'on rencontre quand on veut préciser la notion d'explication mécanique des phénomènes naturels. Quoi qu'il en soit de ces difficultés, le désir impérieux de chercher de telles explications a été, pour le développement de la science, un stimulant d'une très grande fécondité; nous nous en rendrons compte quand nous jetterons un coup d'œil sur les progrès récents de l'optique et de l'électricité. On se priverait incontestablement d'une arme puissante en renonçant à ces tentatives d'explications mécaniques qui ont rendu tant de services. Il faut, toutefois, reconnaître que, dans plusieurs cas, les contradictions et les bizarreries de quelques théories ont amené une sorte de découragement, et que les savants d'aujourd'hui n'ont plus, à ce point de vue, l'enthousiasme des physiciens géomètres de la première moitié du siècle dernier. Il a pu même paraître à quelques-uns qu'il était étrange d'expliquer le connu par l'inconnu, le visible par l'invisible, d'imaginer

par exemple, comme on l'a dit, un éther que nul œil humain ne verra jamais. Une telle accusation est justifiée, si on prend le mot d'explication dans le sens où il a été longtemps employé ; mais elle perd de sa force si on ne cherche dans une explication qu'une image utile et féconde, et si on n'a pas la prétention d'atteindre la réalité, comme je l'ai déjà dit bien des fois. La science peut suivre à la fois des voies diverses, et la multiplicité des points de vue est non seulement légitime, mais indispensable.

Ceci dit, certaines lois ou hypothèses physiques, qui ne sont que la généralisation de faits observés, jouent aujourd'hui un rôle essentiel ; elles ont pour objet d'établir des relations numériques définies entre des grandeurs directement mesurables. Parmi ces lois, celles de l'énergétique sont fondamentales dans la science de notre époque. La thermodynamique a été, en quelque sorte, l'embryon de l'énergétique, qui la comprend comme cas particulier ; deux noms dominent la thermodynamique, ceux de Mayer et de Carnot, et des deux le plus grand est assurément celui de Sadi-Carnot, précurseur prodigieux qui, par ses vues géniales, devança considérablement son temps. La fécondité, dans toutes les parties de la physique, du principe de la conservation de l'énergie a été surtout mise en évidence par Helmholtz et par lord Kelvin. Dans chaque cas particulier on est amené à définir ce que l'on entend

par énergie : c'est ainsi qu'on distingue les énergies mécanique, calorifique, électrique, chimique, radiante, etc., énergies qui se présentent, en général, sous la forme d'un produit de deux facteurs. Avec les formes d'énergie jusqu'ici cataloguées, si je puis dire, le principe de la conservation est vérifié pour tous les phénomènes connus, et le fait que l'on a eu seulement besoin d'introduire un nombre très limité de formes d'énergie constitue la grande importance de cette loi fondamentale. Sous sa forme générale, le *principe de l'énergie* exprime que les différentes formes de l'énergie *interne*, la force vive sensible, le travail accompli et l'énergie cédée (sous forme calorifique, électrique, magnétique, etc.) se transforment les unes dans les autres de manière à avoir une variation totale égale à zéro. La notion d'*énergie interne* est capitale ; s'il n'y a en jeu que des énergies mécaniques et calorifiques, l'énergie interne est une fonction de la disposition relative des différentes parties du système et de leur état physique et chimique.

On devra peut-être un jour introduire d'autres formes d'énergie que celles jusqu'ici considérées, et alors en un certain sens on pourrait être tenté de regarder le principe de la conservation de l'énergie comme une définition ; mais il est clair que si, pour satisfaire à cette définition, il fallait envisager un trop grand nombre de formes d'énergie, le principe cesserait d'exister pour le physicien qui n'en pourrait rien tirer. Quoique nos idées sur la conservation

de l'énergie aient leur origine historique dans le théorème des forces vives de la mécanique rationnelle et qu'un lien se soit trouvé ainsi établi entre la mécanique rationnelle et la physique, ces premiers points de vue sont généralement abandonnés aujourd'hui. L'expérience reste le seul guide dans cette question pour chaque forme d'énergie. Il y a un équivalent mécanique de la chaleur, mais il n'y a pas d'équivalent de l'électricité, car la même quantité d'électricité produit, suivant les circonstances, un travail très différent ; il y a, par contre, un équivalent mécanique de l'énergie électrique.

Pour toute une école de savants, l'énergie n'est pas seulement une conception abstraite sans existence réelle ; elle a pour eux, comme la matière, plus peut-être que la matière, une existence objective, et nous ne pouvons ni la créer ni la détruire. De l'équivalence des différentes formes de l'énergie peut-on conclure à leur identité ? La question, pour l'expérimentateur, n'a pas de sens ; c'est un peu, comme si on demandait si deux corps sont identiques parce qu'ils ont le même poids. La question pour *l'énergie* est plus singulière encore que pour la *matière*, et chacun peut y répondre diversement suivant ses vues théoriques.

Le déplacement de l'énergie est la condition essentielle de l'existence des phénomènes ; or toutes les formes connues de l'énergie ont une tendance à se transformer en énergie calorifique, qui se présente

comme la forme la plus stable. Ainsi, on peut transformer entièrement du travail mécanique en chaleur versée dans une même source, mais il n'est pas possible de réaliser la transformation inverse. D'abord, le principe de Carnot nous apprend qu'une certaine quantité de chaleur ne peut abandonner une source pour se transformer entièrement en travail, ce qui suffit déjà à montrer dans la chaleur une forme inférieure de l'énergie; toutefois, si la transformation est réversible, il y a une sorte de compensation puisque, si une partie de l'énergie est dégradée, une autre se trouve élevée. Mais, quand la transformation est irréversible, il y a une dégradation définitive sans compensation. Ainsi, dans un système soustrait à toute action extérieure et passant par voie irréversible d'un état à un autre, la quantité d'énergie est bien constante, mais la quantité d'énergie *utilisable par nous* pour produire du travail diminue : la *qualité* de l'énergie a diminué. Un tel résultat est produit par le frottement qui rend une transformation irréversible, par des chutes de chaleur par conductibilité ou rayonnement entre les diverses parties du système, par la résistance des conducteurs dans la propagation de l'électricité, par l'hystérésis dans les phénomènes magnétiques, etc. Dans son bel ouvrage sur les principes de la chimie physique, M. Perrin, regarde avec M. Langevin, le principe de Carnot comme *un principe d'évolution* et l'énonce en disant qu'un *système isolé ne passe jamais deux fois par le même état*. On tend d'ailleurs de plus en plus aujour-

d'hui à regarder, conformément aux idées de Boltzmann et de Gibbs, le principe de Carnot comme une loi de probabilité s'appliquant à des systèmes suffisamment complexes, et d'ailleurs pendant un temps qui n'est pas trop long. Il y aura donc des cas où il faudra l'appliquer avec prudence, et il est clair que, dans ces conditions, il faut se garder de généralisations hasardeuses.

Aussi, tout en admirant l'imagination de Clausius et de lord Kelvin et en réservant pour le savant le droit d'être poète à son heure, faut-il ne pas accepter sans réserve les conclusions philosophiques que les deux grands physiciens ont déduites par une gigantesque extrapolation de la loi de la dégradation de l'énergie. Il est exagéré de déduire de principes expérimentaux, dont les vérifications sont bien limitées, des vues générales sur l'avenir de l'Univers. Disons seulement que la thermodynamique n'est pas en opposition avec cette idée que l'Univers marche fatalement dans un sens déterminé, les énergies utilisables s'usant incessamment. Des êtres aux facultés plus aiguisées que les nôtres pourraient-ils s'opposer à cette dissipation de l'énergie ? Sauraient-ils agir sur les variables *cachées* de manière à faire machine en arrière ? Il leur faudrait la subtibilité du petit démon de Maxwell qui pouvait suivre les molécules dans leurs courses.

Cette dégradation est-elle compatible avec une explication mécanique ? C'est un point que j'ai examiné plus haut et sur lequel je n'ai rien à ajouter ; pour M. Boltzmann, le principe de Carnot,

sans être identique au principe de la moindre action, présente avec lui une certaine analogie. Si des tentatives comme celles d'Helmholtz et de Boltzmann sont d'un grand intérêt pour les géomètres, il faut reconnaître que beaucoup de physiciens s'en désintéressent aujourd'hui. Pour plusieurs d'entre eux, les équations de la physique sont des relations quantitatives entre des grandeurs, dont on ne dit pas si elles sont ou non qualitativement irréductibles. J'ai déjà écrit plusieurs fois le mot de *qualité*. Le principe cartésien que tout, dans le monde matériel, s'explique par l'étendue et le mouvement, serait-il abandonné aujourd'hui? Il semblerait que oui, au moins partiellement, quand on entend dire que la chaleur est une forme *dégradée* de l'énergie. Mais il ne faut pas oublier que *qualité* et *dégradation* sont choses relatives à nos possibilités d'action. Nous nous sommes arrêté tout à l'heure sur le mot d'explication mécanique; il a des malléabilités infinies, et nous avons dit qu'on peut donner à la notion du mécanisme un sens très large permettant de concilier bien des contradictions.

La thermodynamique a été l'origine de l'énergétique; aussi celle-ci, à sa naissance, a-t-elle été envahie par un certain nombre de points de vue spéciaux à la thermodynamique, et règne-t-il encore aujourd'hui quelque confusion dans l'exposition des principes généraux de l'énergétique. Depuis quelques années, à la suite des travaux de Gibbs et de

Helmholtz, le rôle d'une fonction importante, le potentiel thermodynamique, a été mis en lumière par divers physiciens, parmi lesquels je dois citer tout particulièrement M. Duhem. Ce potentiel thermodynamique donne la mesure de ce que Carnot appelait la puissance motrice. En France M. Le Chatelier, en Allemagne MM. Meyerhofer et Ostwald reprennent aujourd'hui les points de vue de Carnot en partant de la notion de la puissance motrice, c'est-à-dire de l'aptitude de chaque phénomène à exercer une action sur le monde extérieur; c'est aussi ce que Helmholtz appelait l'énergie libre. Une définition générale est ici impossible comme pour l'énergie, mais, dans chaque cas particulier, on reconnaît que, si deux systèmes de corps sont en présence, il y a échange d'une certaine propriété qui est perdue par l'un des systèmes et gagnée par l'autre, celle de pouvoir se transformer directement, soit isolément, soit en provoquant dans un autre système une transformation inverse; c'est cette propriété qu'on appelle la puissance motrice.

On peut énoncer à ce sujet quelques lois générales. On a d'abord la loi de conservation de la capacité de puissance motrice d'après laquelle, dans toute dépense de puissance motrice, il y a une fonction de changements corrélatifs de même nature qui reste constante, fonction que fait connaître l'expérience; il n'en est pas ainsi, toutefois pour la chaleur, qui constitue une exception parmi les diverses

espèces de puissance motrice. Une seconde loi de l'énergétique consiste dans l'impossibilité de créer de la puissance motrice sans en dépenser ailleurs. elle est la généralisation de l'impossibilité du mouvement perpétuel. Enfin, d'après une troisième loi générale, il est impossible de détruire de la puissance motrice sans créer de la chaleur : c'est, au fond, la loi de Joule. On comprend d'ailleurs que les principes expérimentaux auxquels on rattache les lois générales de l'énergétique puissent être choisis de différentes façons, et à cet égard les intéressants travaux de M. Mouret et du commandant Ariès méritent d'être cités.

Il importe aussi de prévenir toute illusion sur le degré d'utilité à tirer des lois générales de l'énergétique. Leur utilité est en quelque sorte qualitative, elle consiste à prévoir le sens d'un phénomène et à déduire d'une première loi trouvée expérimentalement une proposition réciproque; par exemple, de l'électrisation des cristaux hémièdres par compression, M. Lippmann déduit la déformation des cristaux produite par l'influence électrique. Mais, pour avoir des évaluations quantitatives, il faudra faire intervenir des lois spéciales aux phénomènes étudiés; ce n'est qu'ainsi que la science de l'énergie peut être féconde. Nous en verrons de nombreux exemples en analysant les principaux chapitres de la physique, de la chimie et de la physico-chimie.

On a pu voir dans ce chapitre les deux principales

tendances entre lesquelles se partagent aujourd'hui les savants qui étudient la nature inanimée, depuis les théoriciens qui cherchent les explications mécaniques jusqu'aux expérimentateurs qui se méfient des notions abstraites et supprimeraient même avec plaisir le mot d'entropie du vocabulaire scientifique. Ces tendances extrêmes sont radicalement opposées dans leur esprit, mais pratiquement il y a entre elles bien des ponts, et, dans la recherche, le partisan le plus convaincu de l'énergétique purement expérimentale n'hésite pas à faire parfois certaines représentations dont le caractère est en désaccord avec ses propres idées. Cela est fort heureux; ce n'est qu'en adoptant des points de vue divers, quelquefois opposés, que les sciences progressent. Ne mutilons pas l'esprit humain dans la tâche immense qu'il a à accomplir. Nous allons retrouver ces directions diverses dans tout le développement des sciences physico-chimiques.

# CHAPITRE IV

## La Physique de l'Éther.

I. L'Optique. — II. L'Optique et l'Électricité. — III. Les rayons cathodiques et les rayons X. — IV. Les nouveaux rayonnements et la mécanique des électrons.

---

### I

### L'OPTIQUE

Nous allons examiner rapidement quelques-uns des travaux les plus importants se rapportant aux diverses parties de la Physique et de la Chimie. Commençons par l'optique et l'électricité, où des découvertes inattendues sont venues, dans ces derniers temps, frapper l'attention des personnes les plus étrangères aux progrès des sciences. Nous plaçant ici à un point de vue général, nous ne pouvons songer à entrer dans les détails et nous devons surtout insister sur les idées générales concernant la philosophie naturelle, auxquelles conduit l'ensemble des faits observés.

L'optique et l'électricité sont la physique de l'éther. On sait que les physiciens considèrent la lumière comme un ébranlement périodique d'un milieu élastique, l'éther, qui remplit l'espace et pénètre les corps. Cette image d'un milieu rentrant dans la catégorie des masses cachées, dont nous parlions avec Helmholtz et Hertz, rend bien compte de la grande majorité des phénomènes observés, et si, en quelques points, des difficultés subsistent, l'ensemble de la théorie élastique n'en forme pas moins un admirable monument. La lumière visible correspond à des vibrations dont le nombre varie, quand on passe de l'infra-rouge au violet extrême, entre quatre cents et huit cents trillions par seconde; la longueur d'onde d'une radiation déterminée la définissant complètement et demeurant en général identique à elle-même, on a tout naturellement pensé à en faire un étalon de longueur. Son seul inconvénient est son extrême petitesse, et il a fallu une grande ingéniosité, pour évaluer le mètre en longueur d'onde, à M. Michelson qui a effectué ce beau travail au Bureau international des poids et mesures, et a exprimé le mètre en fonction de la longueur d'onde de la raie rouge du spectre du cadmium.

On a été longtemps avant de produire des ondes lumineuses stationnaires analogues à celles que présentent, par exemple, en acoustique, les tuyaux sonores; c'est en cherchant la solution de ce problème que M. Lippmann a pu effectuer la photo-

graphie des couleurs. Dans un ordre d'idées plus théorique, la même question a permis à M. Wiener de montrer que, dans un rayon polarisé, la direction des vibrations lumineuses est perpendiculaire au plan de polarisation, si toutefois on admet, comme l'a fait remarquer M. Poincaré, que l'impression photographique résulte de la force vive du mouvement vibratoire de l'éther, en se laissant guider par l'analogie avec l'acoustique. L'éther, qui remplit le vide, pénètre aussi l'intérieur des corps, et ce n'est pas une des moindres difficultés de la théorie que de se rendre compte des propriétés de ce milieu élastique à travers lequel se meuvent les corps célestes. L'étude des phénomènes optiques dans les corps en mouvement a fait l'objet de recherches délicates qui ne sont pas définitives. Dans cet ordre de questions, le premier phénomène est celui que les astronomes appellent l'aberration de la lumière, et d'après lequel, par suite du mouvement de la terre, une étoile n'est pas vue dans sa véritable direction, mais suivant une direction inclinée sur celle-ci dans le sens du mouvement terrestre. Pour expliquer l'aberration de la lumière, il faut supposer qu'il y a un entraînement partiel de l'éther par la matière. Les vues théoriques de Fresnel, à ce sujet, ont été confirmées par une expérience mémorable de Fizeau, reprise avec succès en Amérique, expérience dans laquelle on mesure la différence de phase qu'ont acquise deux rayons lumineux à la

sortie de deux tubes parallèles qu'ils ont parcourus à la fois dans le même sens, tandis que deux courants d'eau rapides parcouraient les tubes dans des sens opposés.

On a cherché si le mouvement de translation de la terre pouvait être mis en évidence au moyen de phénomènes optiques réalisés à la surface terrestre; les résultats ont été négatifs. Dans toutes ces expériences, les termes de l'ordre du carré de l'aberration étaient négligeables et la théorie en rend bien compte à ce degré d'approximation. Il y a cependant une expérience récente de M. Michelson, dont le résultat aussi a été négatif, et où les termes de l'ordre du carré de l'aberration sont sensibles; c'est une expérience d'interférence de deux rayons lumineux dans des circonstances particulières. La question reste donc toujours ouverte de savoir si le mouvement absolu peut être mis en évidence.

Il n'est pas facile de se rendre compte de la nature de l'éther, en cherchant à faire des comparaisons avec les milieux qui nous sont familiers. Plusieurs pensent que c'est là un effort inutile, *qu'il est même puéril d'expliquer le simple par le composé, et que c'est l'inverse qu'il faut faire, c'est-à-dire expliquer la matière par l'éther.* Il y a cependant encore des mécaniciens, tout à fait classiques, aimant par-dessus tout les représentations cinématiques et cherchant dans le visible une représentation de l'invisible. De ce nombre est M. Boussinesq,

dont les beaux travaux sur la mécanique des fluides et sur l'élasticité ont rendu le nom illustre; il aime à rattacher les théories qu'il développe sur l'éther à des expériences hydrodynamiques, comme celles de Du Buat, sur la résistance opposée par l'eau au mouvement d'un pendule. L'éther paraît, à première vue, jouir de propriétés contradictoires, puisque, comme un fluide de densité très faible, il n'oppose qu'une résistance insensible au mouvement des planètes, tandis que d'autre part il transmet, comme un solide, des vibrations transversales. M. Boussinesq tente d'expliquer ces contradictions par la lenteur relative du mouvement des corps célestes, permettant à l'éther de conserver sa parité de constitution en tous sens et par suite les propriétés des fluides, tandis que la fluidité s'efface pour faire place à l'élasticité devant l'excessive vitesse des vibrations lumineuses. Quant à la densité de l'éther, elle ne peut être qu'extrêmement faible, et on doit le regarder comme *impondérable*, c'est-à dire de *gravité* nulle. Ceci veut dire que les molécules d'éther sont simplement sensibles aux actions des molécules (de matière ou d'éther) extrêmement voisines, mais que le coefficient d'attraction newtonienne est nul pour elles. Au sujet de la constance de ce coefficient d'attraction pour tous les corps de notre système solaire et même stellaire, M. Boussinesq a émis une idée curieuse : ce serait une *sélection* inévitable, qui n'aurait

maintenu dans le système et laissé participer à ses mouvements, à l'époque où il était une nébuleuse très diluée soustraite par sa raréfaction aux actions moléculaires, que des substances gravitant également (c'est-à-dire avec même coefficient d'attraction), à l'exception toutefois des matières de gravité nulle, comme l'éther, qui sont restées répandues dans tout l'espace. Dans d'autres systèmes stellaires, ceux des nébuleuses non résolubles dont nous parlions plus haut, il se peut que le coefficient d'attraction soit différent.

Mais revenons à l'optique proprement dite. L'optique classique des radiations lumineuses a fait, depuis vingt ans, des progrès importants. Les procédés d'observation ont acquis une précision merveilleuse. Il est maintes fois arrivé à l'homme de génie de faire les plus fécondes découvertes avec les plus petits moyens ; on le verra sans doute encore, mais cependant dans les parties de la science déjà beaucoup élaborées, la perfection des procédés d'observation jouera désormais un rôle de plus en plus considérable. En spectroscopie, par exemple, l'âge héroïque de Kirchoff et Bunsen est déjà loin ; il faut avoir recours aux réseaux de diffraction et aux spectroscopes à échelons pour séparer les composantes très rapprochées d'une raie multiple. C'est ce qui fait qu'aujourd'hui la science coûte souvent très cher.

Une question extrêmement importante est celle

de la structure des spectres. M. Deslandres est arrivé à résoudre des spectres de bandes lumineux en plus de quatre mille raies, constituant un ensemble de vibrations simples, simultanées et dues à une même cause. Il a pu démêler dans la disposition de cet ensemble des lois arithmétiques simples, et donner une formule dépendant des carrés de trois entiers arbitraires. De telles recherches ont un intérêt de premier ordre ; les théories sur la matière devront rendre compte de ces décompositions d'un type si différent de celui auquel nous ont habitués d'autres phénomènes, comme les harmoniques d'un tuyau sonore ou d'une membrane vibrante. Les théories élastiques ne paraissent pas capables d'en donner l'explication ; peut-être les théories électriques dont nous parlerons tout à l'heure seront-elles plus heureuses.

Une raie du spectre est caractérisée par sa longueur d'onde dans le vide. Existe-t-il des circonstances qui puissent modifier cette longueur d'onde et, par suite, la durée de la vibration ? On obtient une modification apparente de la longueur d'onde dans ce que l'on appelle l'effet Döppler-Fizeau ; il consiste dans un changement de longueur d'onde observé lorsque la distance de la source à l'observateur change rapidement. Dans le cas des ondes sonores, cet effet est facile à constater, le sifflet d'une locomotive nous paraissant rendre un son plus aigu quand on s'en approche, et plus grave

quand on s'en éloigne. Dans le cas des ondes lumineuses, on a au spectroscope un déplacement de raie par rapport à une source fixe pour l'observateur; les observations faites en astronomie sur les spectres des astres ont permis d'utiliser le principe précédent. On a pu ainsi obtenir les composantes de la vitesse de certains astres dans la direction du rayon visuel; ainsi se trouve décelé le mouvement de l'astre suivant la troisième dimension de l'espace, qui avait jusqu'ici échappé à toute mesure. Il ne s'agit, d'ailleurs, dans tout ceci, que d'un changement apparent dans la longueur d'onde ; en parlant plus loin de la belle découverte faite par M. Zeemann, nous aurons un exemple d'un changement réel.

L'éther transmet autre chose que la lumière. Au commencement du siècle dernier on découvrait les rayons calorifiques ultra-rouges et peu après les rayons ultra-violets capables d'agir sur certains composés chimiques. Chacune de ces radiations, dans le vide ou dans l'air, est caractérisée, comme nous l'avons dit, par sa longueur d'onde, c'est-à-dire l'espace parcouru par l'onde pendant la durée d'une période vibratoire. Ces longueurs sont extrêmement petites; pour les rayons visibles, elles varient de $0^{\mu},734$ pour le rouge extrême à $0^{\mu},396$ pour le violet extrême, en désignant par $\mu$ le micron ou millième de millimètre. Un phénomène capital est la dispersion : il consiste en ce qu'un rayon lumi-

neux ou calorifique pénétrant dans un corps transparent est dévié. L'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde ; ceci montre que, contrairement à ce qui se passe dans le vide, la vitesse de propagation dans le corps n'est pas la même pour toutes les vibrations. C'est là un point extrêmement important et qui tient à l'action de la matière pondérable sur l'éther, dont nous avons déjà dit un mot tout à l'heure. On a proposé, au sujet de cette action, diverses hypothèses donnant lieu à autant de théories de la dispersion, qui ont conduit à des relations entre l'indice de réfraction et la longueur d'onde prise soit dans le vide, soit dans le corps considéré, relations que l'expérience vérifie dans des intervalles plus ou moins larges. Les théories les plus satisfaisantes sont celles d'Helmholtz et de M. Boussinesq ; elles rendent notamment bien compte des phénomènes d'absorption et de dispersion anomale, un type de ceux-ci étant fourni par la vapeur d'iode, dont les propriétés absorbantes sont si remarquables et qui réfracte plus fortement le rouge que le violet (contrairement à ce qui a lieu pour les corps transparents) comme l'a montré autrefois M. Le Roux.

Parmi les radiations ultra-violettes, les plus courtes mesurées jusqu'ici correspondent à $0^{\mu},100$. Le spectre infra-rouge a surtout fait, dans ces vingt dernières années, l'objet de travaux nombreux. Pour pénétrer très avant dans l'étude de ces grandes

longueurs d'onde, il faut recourir à l'observation de l'action calorifique. MM. Desains et Curie avaient déterminé la dispersion d'un prisme de sel gemme jusqu'à la longueur d'onde 7 μ et, en isolant, au moyen d'un diaphragme, une série de raies du spectre infra-rouge, mesuré la longueur d'onde de chacune d'elles avec un réseau et une pile thermo-électrique. M. Langley a poussé beaucoup plus loin ces recherches, en employant un instrument d'une merveilleuse sensibilité, le bolomètre ; il a été possible d'aller ainsi jusqu'à des longueurs d'onde de 22 μ. La séparation des rayons calorifiques de grande longueur d'onde au moyen de la réflexion métallique a permis à M. Rubens d'aller plus loin encore, et la carte géographique de l'infra-rouge a pu être poussée jusqu'à des longueurs d'onde de 70 μ. Il semble que ce soit pour le moment la limite extrême des grandes longueurs d'onde auxquelles on soit parvenu en optique. Nous allons rencontrer bientôt en électricité des longueurs d'onde considérables, mais les plus courtes d'entre elles ne rejoindront pas encore les plus grandes radiations de l'infra-rouge.

Nous avons déjà parlé plusieurs fois, notamment à propos de l'aberration et de la dispersion, de l'action de la matière pondérable sur l'éther. Nous rencontrons encore l'action de l'éther (ou de la lumière) sur la matière pondérable dans les phénomenes, très délicats à observer, où se manifeste la

pression exercée sur une surface par un faisceau de rayons lumineux. Cette force, dont Maxwell et Bartoli avaient théoriquement prédit l'existence, a été mise en évidence par M. Lebedef ; dans de telles expériences, il faut éliminer les effets provenant de l'échauffement, comme les forces provoquées par la convection des gaz, et aussi les forces de la nature de celles qui sont en jeu dans le radiomètre de Crookes. On comprend que la répulsion provenant de la radiation solaire doive jouer un rôle dans le mouvement des comètes et dans les apparences que présentent ces astres étranges ; ainsi se trouve expliquée la force répulsive émanant du soleil, invoquée autrefois par M. Faye. Au point de vue *du principe de l'égalité de l'action et de la réaction*, cette action exercée sur les corps par la lumière soulève de graves difficultés, puisqu'il faut faire intervenir dans l'application du principe non seulement la matière, mais aussi l'éther.

Ne quittons pas l'optique classique sans dire un mot de l'instrument qui a transformé les sciences physiques et surtout les sciences biologiques, le microscope. En opérant dans les conditions les plus favorables, on arrivait jusque dans ces dernières années à obtenir pour deux points des images distinctes, quand leur distance n'était pas inférieure à environ un huitième de micron. Avec des dispositifs spéciaux, on peut aller plus loin aujourd'hui, car le problème est autre si, au lieu d'avoir un

champ éclairé, on regarde sur un fond obscur des objets lumineux par eux-mêmes; c'est ce qui arrive déjà pour les étoiles regardées le jour ou la nuit même à l'œil nu. Il y a peu d'objets lumineux par eux-mêmes, mais on a l'équivalent en éclairant vivement l'objet de manière que le faisceau éclairant ne pénètre pas dans le microscope; on peut augmenter ainsi notablement la puissance du microscope et apercevoir des objets dits *ultramicroscopiques*, dont les diamètres sont environ vingt-cinq fois plus petits que les objets *microscopiques* les plus petits, ce qui nous conduit aux cinq millièmes de micron.

Parmi les observations d'un intérêt philosophique général faites avec le microscope, d'ailleurs de moyenne puissance, il n'en est peut-être pas de plus importante que celle du mouvement *brownien*, récemment reprise par M. Gouy. Une goutte d'eau, par exemple, tenant en suspension quelque poussière minérale ou organique, est le siège de mouvements continuels. Chaque particule se meut autour de sa position moyenne : c'est une trépidation sans fin, comme l'a observé M. Gouy dans des préparations bien closes conservées pendant plusieurs années. Alors que nous voyons autour de nous tous les mouvements s'éteindre, quand on ne les entretient pas, par suite de résistances passives, le mouvement brownien est persistant, ou, du moins, semble persister très longtemps. Il paraît y avoir opposition

avec la loi d'évolution qu'est le principe de Carnot. C'est ici qu'on voit la nécessité de regarder ce principe comme s'appliquant seulement à des ensembles suffisamment complexes ; on ne doit pas l'appliquer à ces mouvements moléculaires cachés qui, d'après l'explication de M. Gouy, sont la cause des mouvements des particules en suspension dans le liquide. Il faut avouer que tout cela laisse un peu perplexe, et l'on se demande si, comme dans l'exemple précédent, des masses cachées devenant apparentes avec le microscope, ne risquent pas de mettre en péril les principes regardés comme les plus solidement établis.

## II

### L'OPTIQUE ET L'ÉLECTRICITÉ

La lumière et l'électricité sont restées longtemps deux domaines entièrement distincts. Le génie du grand physicien anglais Maxwell sut établir un rapprochement entre ces deux régions de la science. Maxwell repousse, comme Faraday, toute action à distance. Pour lui, tout corps électrique ou magnétique agit seulement sur les parties qui l'avoisinent immédiatement d'un milieu remplissant l'espace; ces actions se transmettent de proche en proche jusqu'à un autre corps. Dans cette théorie, les isolants ou diélectriques jouent un rôle prépondérant;

ils sont pénétrés par un fluide élastique hypothétique, analogue à l'éther, qui, en optique, transmet les radiations lumineuses. Maxwell est amené ainsi à étudier comment se propagent les perturbations provenant des variations périodiques d'un champ magnétique. En s'appuyant sur les lois connues de l'électricité et du magnétisme, et sur quelques hypothèses complémentaires, il trouve que les perturbations électromagnétiques doivent se propager avec une vitesse égale au rapport des unités absolues électrostatique et électromagnétique, et l'expérience lui montre que cette vitesse est celle de la lumière. Il est naturel alors de regarder comme identiques l'éther et le fluide que l'on suppose présider aux actions électromagnétiques, et d'envisager la lumière comme un phénomène électromagnétique résultant des perturbations d'un champ magnétique : c'est la théorie électromagnétique de la lumière. Dans cet ordre d'idées, une onde lumineuse est produite par une suite de courants alternatifs qui se propagent par induction dans le vide ou dans les diélectriques et qui changent de sens un nombre immense de fois par seconde. Nous ne pouvons, d'ailleurs, nous faire aucune idée du procédé par lequel est entretenue, dans un corps lumineux, cette perturbation magnétique excessivement rapide.

Les vues géniales de Maxwell devaient conserver longtemps un caractère hypothétique ; dans aucune expérience, on n'avait jamais mis en évidence la

propagation d'une onde électromagnétique. C'est en 1888 que le physicien Hertz réalisa les expériences, à jamais mémorables, sur la propagation des ondes appelées aujourd'hui ondes hertziennes, en utilisant les décharges oscillantes d'un condensateur comme source de courants alternatifs à périodes extrêmement courtes. Depuis Hertz, de nombreux expérimentateurs ont apporté d'importants perfectionnements à ses méthodes. Il est d'un grand intérêt d'obtenir des longueurs d'onde les plus courtes possible dans une perturbation électromagnétique. On est arrivé à des longueurs d'onde de 6 millimètres ce qui correspond à 50 milliards de vibrations par seconde. Nous sommes encore loin du nombre de vibrations correspondant aux rayons du spectre visible; il suffirait cependant de multiplier le nombre précédent par 10.000 pour obtenir un nombre de vibrations impressionnant la rétine et correspondant à la couleur orangée du spectre. En multipliant par 100, on rejoindrait à peu près les radiations que nous avons rencontrées tout à l'heure en parlant du spectre infra-rouge.

On a élargi le nouveau champ d'études, pour voir si l'analogie entre les deux ordres de phénomènes électrique et optique se poursuivait. Ainsi est née une sorte d'optique des oscillations électriques, dans laquelle on a cherché à imiter avec les radiations électriques les phénomènes depuis longtemps connus pour les radiations lumineuses, les uns et les

autres ne différant, au point de vue de Maxwell et de Hertz, que par la longueur des périodes. On doit s'attendre à ce que, plus la longueur d'onde des oscillations électriques sera petite, plus l'imitation sera satisfaite. Il en a bien été ainsi dans les nombreuses expériences faites depuis quinze ans; interférences, réfraction et réflexion, diffraction, double réfraction se retrouvent comme dans l'optique de la lumière. Dans les expériences électriques, les corps conducteurs et les électrolytes jouent, en général, le rôle des corps opaques en optique, et les corps isolants sont les analogues des corps transparents; ainsi, les métaux arrêtent comme un écran les ondulations électriques, au moins celles d'assez courtes périodes. Tous ces résultats paraissent confirmer l'identité entre les phénomènes lumineux et certains phénomènes électriques ; ils sont d'une importance capitale pour la philosophie naturelle.

Nous avons donc, en résumé, pour la lumière deux théories : une théorie élastique et une théorie électrique. Ces théories apparaissent comme bien différentes dans leurs points de départ; cependant, si, du moins, nous nous bornons à un milieu diélectrique et non magnétique, les équations différentielles traduisant analytiquement les phénomènes sont identiques. Les grandeurs qui y figurent n'ont évidemment pas la même signification. Dans la théorie élastique, tel vecteur représentera la vitesse d'une

molécule d'éther, tandis que, dans l'autre théorie, il représentera la force électrique. Pour employer le langage dont nous nous sommes servi dans le chapitre précédent, nous pouvons dire que nous avons là deux *images* différentes, et cet exemple vient à l'appui de ce que nous avancions sur la possibilité d'images diverses pour expliquer une même catégorie de phénomènes.

A un point de vue purement électrique, on doit remarquer que les manifestations mises en jeu par les perturbations hertziennes sont très spéciales. Ainsi, les courants continus se propagent le long d'un fil d'une tout autre manière que les perturbations de périodes extrêmement courtes; ce n'est que pour celle-ci que la vitesse de transmission est égale à la vitesse de la lumière, comme le montrent les belles expériences de M. Blondlot. On ne peut dire que tous les phénomènes électriques puissent être regardés comme résultant des mouvements de l'éther.

Une application des perturbations hertziennes appelle aujourd'hui vivement l'attention, je veux parler de la télégraphie sans fil. Son point de départ a été une découverte faite par M. Branly : un tube renfermant de fines limailles métalliques est rendu conducteur quand on vient à produire dans son voisinage une ou plusieurs décharges électriques, et la limaille reprend sa résistance primitive quand on donne au tube une petite secousse. De la conductibilité intermittente des radio-conducteurs de M. Branly, MM. Marconi et

Popof ont tiré la télégraphie sans fil, remarquable exemple, après tant d'autres, d'une application pratique, conséquence de spéculations, comme celles de Maxwell, dont le caractère au début avait été uniquement théorique. On peut dire de la télégraphie sans fil qu'elle est une télégraphie optique; seulement, les ondes, au lieu d'être extrêmement courtes, ont les longueurs relativement considérables signalées plus haut.

Nous avons parlé plus haut de l'effet Döppler-Fizeau, qui constitue un changement apparent dans la longueur d'onde d'une source lumineuse en mouvement. On s'est préoccupé depuis longtemps de trouver des circonstances qui modifient réellement la longueur d'onde d'une source de lumière. Faraday espérait les trouver en faisant agir le magnétisme; dans son expérience classique, la direction de la vibration est modifiée, mais non sa lumière, et il en est de même dans les recherches relatives à la réflexion sur des métaux aimantés. Il semble bien que la variation de la pression dans certaines vapeurs amène un changement dans la longueur d'onde. Quant au magnétisme, il était réservé à M. Zeemann d'établir, d'une façon irréfutable, l'existence de son action directe sur l'émission lumineuse.

Les belles expériences de M. Zeemann nous intéressent ici d'autant plus que leurs résultats essentiels avaient été prévus par une théorie qui tend aujourd'hui à prendre une place considérable en optique et en

électricité, la théorie de M. Lorentz; j'en dois dire quelques mots pour avoir passé en revue les idées théoriques essentielles développées récemment en optique et en électricité. Pour M. Lorentz, l'électricité adhère à la matière, et les phénomènes électriques sont dus à certaines petites masses matérielles très ténues et chargées d'électricité. Ces petits corps furent appelés primitivement ions ou électrons, mais le mot *électron* est employé aujourd'hui avec une signification différente, dont il sera question plus loin. Ici, pour le moment, conservons la dénomination d'*ions*, quoique ce mot soit, lui aussi, généralement usité maintenant dans un sens plus précis. En électricité, les mouvements des ions expliquent les courants électriques dans les conducteurs, résultat en accord avec les expériences de Rowland qui a reconnu que le transport mécanique d'une charge électrostatique équivaut à un courant dirigé dans le sens du mouvement; dans les diélectriques, au contraire, les ions ne peuvent s'écarter que peu de leurs positions d'équilibre. Pour la lumière, il existe dans chaque molécule rayonnante une ou plusieurs parties capables de vibrer autour d'une position moyenne; les ions, ainsi vibrants, doivent donner lieu à des ondes électromagnétiques qui se propagent.

M. Lorentz a pu prévoir, dans le cas le plus simple, le phénomène observé ensuite par M. Zeeman, où le magnétisme agissant sur une source lumineuse

monochromatique vient la modifier dans la durée de sa période et la polariser. D'après la théorie élémentaire, à la place d'une raie unique doivent apparaître, suivant la direction dans laquelle on observe, un doublet ou un triplet de raies. C'est ce qu'a montré l'expérience dans un grand nombre de cas ; à la vérité, il y a parfois, comme l'ont trouvé MM. Cornu et Becquerel, un quadruplet, et les vues théoriques ont dû être un peu élargies, mais le phénomène de M. Zeeman n'en reste pas moins un mémorable exemple d'un fait d'une importance capitale annoncé d'abord par la théorie.

A un point de vue général, les idées de M. Lorentz appelleraient bien des réflexions. Au premier abord, elles ont quelque chose d'un peu singulier par la manière dont elles matérialisent l'électricité : la théorie de M. Lorentz est beaucoup plus que celle de Maxwell et Hertz une tentative d'explication mécanique, au sens où on croyait autrefois entendre ce mot. Il semble qu'elle explique certains phénomènes optiques dont ne rend pas compte l'autre théorie. Mais, pour le moment, il y a lieu de les conserver toutes deux ; suivant les phénomènes, il est plus simple de s'adresser à l'une ou à l'autre. Pendant longtemps encore, dans cette physique de l'éther, quand on tentera d'entrer dans le mécanisme des phénomènes, il sera utile d'avoir à sa disposition plusieurs systèmes de représentations.

## III

### LES RAYONS CATHODIQUES ET LES RAYONS X

L'optique, prise dans son sens le plus large, ne s'est pas seulement augmentée récemment des rayons hertziens. D'autres rayonnements sont encore venus s'ajouter à ceux que nos connaissions déjà : leur étude a été singulièrement féconde et a conduit aux applications les plus curieuses et aux plus étranges conséquences théoriques. On savait, depuis les travaux de Crookes, que les décharges électriques passant dans l'atmosphère suffisamment raréfiée d'une ampoule de verre, provoquent à la cathode une émission de rayons dits *cathodiques*, reconnaissables à la lumière qu'ils excitent en frappant diverses substances, déviables à l'approche d'un aimant et, par là, différant *a priori* de tous les rayons lumineux connus. Dans ces dix dernières années, les recherches sur les rayons cathodiques se sont multipliées ; elles ont amené indirectement à la découverte des rayons Röntgen, puis à celles des rayons de Becquerel. Une première observation fut que les rayons cathodiques peuvent traverser des couches de matière suffisamment minces, telles qu'une mince feuille d'aluminium recouvrant une petite ouverture pratiquée dans la paroi de l'ampoule de Crookes, comme l'a remarqué

M. Lénard. Les rayons continuent à se propager dans l'atmosphère extérieure, tout en étant fortement diffusés, et ils déchargent rapidement les conducteurs électrisés, propriété jusqu'alors inconnue. En outre, la propagation se fait dans un gaz d'autant plus loin que celui-ci est plus léger et plus raréfié.

Quelle est la nature des rayons cathodiques? Le fait que le milieu gazeux nécessaire au passage des décharges électriques et à l'excitation des rayons cathodiques est non seulement inutile, mais encore nuisible à la propagation de ces rayons, devait nécessairement amener une comparaison entre ces rayons et les rayons lumineux. Les physiciens allemands, à la suite de Hertz, regardèrent les rayons cathodiques comme un mode d'ondulation de l'éther lumineux. Mais, en face de cette théorie d'*ondulation*, s'est dressée la théorie d'*émission* de l'École anglaise qui a définitivement prévalu. Crookes, étudiant jadis les actions mécanique et calorifique des rayons cathodiques, avait admis que ces actions sont dues à un bombardement formé de la matière du gaz raréfié sous un état spécial : c'est l'état radiant. La matière radiante était, pour Crookes, formée de particules animées d'une très grande vitesse et électrisées négativement.

La théorie d'émission a eu le mérite de faire prévoir notamment l'électrisation négative des rayons cathodiques, propriété capitale démontrée nettement

par M. Perrin ; elle permet de comprendre l'existence et le sens de la déviation magnétique des rayons cathodiques qui se comportent, en effet, dans ce phénomène comme le ferait un courant. Pour arriver à déterminer la vitesse des rayons, MM. Becquerel et J.-J. Thomson interprétèrent la déviation magnétique ou électrique de ces rayons en supposant que le flux d'électricité cathodique est formé de particules matérielles électrisées négativement. La théorie, développée suivant ce principe, permit de calculer la vitesse de propagation des rayons cathodiques d'après les valeurs observées des déviations magnétique et électrique de ces rayons, et en même temps le rapport de la charge des particules à leur masse. Cette vitesse est d'autant plus grande que les rayons sont moins déviés par l'aimant et atteint dans les expériences actuelles jusqu'au tiers de la vitesse de la lumière. Mais cette grande vitesse du bombardement cathodique anime seulement une masse qui, d'après les mêmes expériences interprétées par la même théorie, n'est que la deux millième partie environ de la masse d'hydrogène capable, dans l'électrolyse, de transporter la même quantité d'électricité que les rayons cathodiques. Un point important est que le rapport de la charge à la masse de la particule électrisée en mouvement est constant, c'est-à-dire indépendant de la nature du gaz, et il en est de même de la vitesse des particules pour un même potentiel de décharge.

Il semblerait donc établi que les phénomènes cathodiques sont les mêmes dans tous les gaz, et, par suite, que les particules cathodiques sont constituées par une matière unique ayant, dans ces conditions, un équivalent électrochimique deux mille fois plus petit que l'hydrogène. Ces conséquences et bien d'autres ont été découvertes grâce au mouvement d'idées produit par la théorie d'émission de l'École anglaise, généralement acceptée aujourd'hui, et qui a provoqué en France les importantes recherches de M. Perrin, de M. Villard, et de plusieurs autres physiciens. Ainsi, la théorie d'émission triomphe pour le moment, puisqu'elle se montre d'une très grande fécondité. Quant à la théorie ondulatoire, doit-elle être rejetée définitivement? Il serait imprudent de l'affirmer; pour qu'elle redevienne utile, il faudrait imaginer quelque mode nouveau de perturbation de l'éther correspondant au transport des charges négatives, mais il semble que ce serait aller au devant de bien grandes complications.

Des considérations indiquées ci-dessus, résulte que la masse d'une particule cathodique est très petite, environ la deux millième partie de la masse de l'atome d'hydrogène. M. J.-J. Thomson a été ainsi conduit à esquisser quelques vues générales sur la constitution de la matière dont je dois dire un mot. On a dans ce que les physiciens anglais ont longtemps appelé l'état radiant, un nouvel état de la

matière. Tandis que, dans l'état ordinaire, les molécules ont des masses différentes avec la nature de la substance, les corpuscules de la matière radiante ont une masse invariable, de quelque substance qu'ils proviennent, cette masse étant le deux millième de celle d'un atome d'hydrogène ; de plus, chacun de ces corpuscules porte une charge d'électricité négative qui est constante. Pour M. J.-J. Thomson, l'état corpusculaire fournit une représentation du fluide électrique dans la théorie d'un seul fluide. L'existence de la matière à l'état corpusculaire ne se manifeste pas seulement dans la production des rayons cathodiques ; M. Thomson trouve la matière à cet état au voisinage d'une plaque métallique éclairée par la lumière ultra-violette. Il développe, de plus, toute une théorie qui n'est pas sans analogie avec celle de M. Lorentz, dont nous parlions plus haut, d'après laquelle la matière corpusculaire pénètre tous les corps métalliques ; dans ceux-ci, comme dans les solutions, les charges électriques sont portées par des corpuscules.

Outre les rayons cathodiques, on distingue encore dans un tube de Crookes les rayons magnéto-cathodiques, entrevus par Plucker, signalés ensuite par M. Broca, et étudiés d'une manière approfondie, dans ces derniers temps, par M. Villard. Ces rayons se disposent suivant un tube de force magnétique ayant pour base la cathode ; ils ne transportent pas d'électricité et sont déviés dans un champ électrique

perpendiculairement à la force électrique. M. Villard a fait la très intéressante remarque que l'on constate ainsi pour la première fois une action du champ électrique perpendiculaire à sa direction, comme l'action du champ magnétique définie par la loi de Laplace. On pourrait supposer que les rayons magnéto-cathodiques transportent des particules magnétiques, comme les rayons cathodiques transportent des particules électriques, mais il convient d'attendre de nouvelles expériences.

Après les rayons cathodiques, nous devons mentionner les rayons désignés sous le nom de rayons *X*. Leur découverte est due à M. Röntgen ; l'illustre physicien montra en 1895, qu'à l'extérieur d'une ampoule cathodique en activité se propage une nouvelle espèce de rayons capables, à la manière des rayons ultra-violets, de révéler leur présence en illuminant le platinocyanure de barium et diverses substances dans lesquelles ils excitent une phosphorescence visible, capables aussi d'impressionner les plaques photographiques même après avoir traversé des corps opaques pour tous les rayons lumineux connus. De plus, ils se propagent très exactement en ligne droite, sans se réfracter ni se diffracter. Ils sont absorbés par les divers corps, suivant la nature des éléments chimiques qui les constituent, les éléments de plus faibles poids atomiques étant, en général, les moins absorbants ; par là, ils se rapprochent des rayons cathodiques, mais ils sont

bien plus pénétrants que ceux-ci. Les rayons de Röntgen se différencient surtout des rayons cathodiques en ce qu'ils ne sont point déviés par les champs magnétiques ou électriques, et qu'ils ne transportent point de charges électriques.

Les physiciens discutent encore sur la nature des rayons *X*. On a en vain essayé de réaliser des expériences d'interférences et de polarisation avec les rayons de Röntgen, qui semblait, au début, disposé à voir des vibrations longitudinales de l'éther, dans les phénomènes qu'il avait découverts. On a pensé que l'émission de ces rayons serait due à un effet d'induction électromagnétique développée dans l'éther du vide par l'arrêt brusque des projectiles cathodiques au moment où ils rencontrent une paroi du tube de Crookes; les rayons *X* pourraient alors être comparés à des rayons lumineux de longueurs d'onde extrêmement petites, et ce seraient des rayons ultra-ultra violets. On comprend ainsi qu'ils ne se diffractent pas sensiblement; on voit moins bien pourquoi ils ne se réfractent pas, à moins d'admettre, avec M. Boussinesq, qu'il n'y a plus de réfraction quand les longueurs d'ondulation ne sont plus qu'une petite fraction des dimensions de la molécule, comme s'annule sensiblement sur une mer agitée l'impulsion d'ensemble que subit, de la part des vagues, un très grand navire assez étendu pour en recouvrir toujours plusieurs.

Il semble que beaucoup de physiciens adoptent

maintenant une explication proposée par Stokes. Les chocs des projectiles cathodiques ne produisent pas une succession continue d'ondes analogues à celles que produisent la lumière, mais des ondes *solitaires* comme il s'en rencontre en hydraulique, quand on lève brusquement une vanne. Il n'y a donc pas, dit-on, dans les rayons *X* la périodicité qui est, en optique, l'origine des phénomènes de réfraction et de polarisation ; mais ceci est très contestable, les ondes solitaires se produisant périodiquement.

Un chapitre intéressant a été ajouté à l'étude des rayons *X* par M. Sagnac : c'est celui des rayons secondaires. Tous les corps se comportent comme des milieux troubles pour les rayons *X*. Cette dissémination, au moins dans les corps de gros poids atomiques, comme le plomb, est accompagnée d'une transformation des rayons en rayons *secondaires*, plus absorbables que les rayons générateurs. L'émission secondaire est par là comparable, dans une certaine mesure, à la transformation d'une lumière qui frappe un corps fluorescent en une lumière de couleur différente, mais elle se présente comme une propriété surtout atomique. De plus, ces rayons secondaires semblent formés eux-mêmes par un mélange de rayons non déviés et de rayons analogues aux rayons cathodiques ; en fait, ils sont électrisés négativement.

Outre les propriétés de rendre certains corps fluorescents et d'impressionner les plaques photo-

graphiques, les rayons *X* possèdent la propriété de décharger les conducteurs électrisés, même quand les rayons traversent seulement les gaz soumis aux champs électriques des conducteurs sans effleurer ceux-ci. Quand les rayons *X* frappent un conducteur électrisé, à l'action de décharge due à la conductibilité du gaz s'ajoute une action supplémentaire variant avec le métal, et qui provient des rayons secondaires issus du métal.

Rappelons enfin que, la propagation rectiligne des rayons *X* à travers les corps a permis d'observer l'intérieur des corps opaques à la lumière par le simple examen des silhouettes de ces corps projetées par un tube à rayons *X* sur un écran phosphorescent (radioscopie) ou sur une plaque photographique qu'on peut, après développement, observer à loisir (radiographie). Cette méthode d'exploration, due à M. Röntgen, appliquée à l'intérieur du corps humain, a rendu de grands services à la médecine et à la chirurgie; elle a rendu populaires les rayons *X*.

## IV

### LES NOUVEAUX RAYONNEMENTS ET LA MÉCANIQUE DES ÉLECTRONS

Les rayons hertziens, les rayons cathodiques et les rayons *X* ne sont pas les seules conquêtes faites, depuis vingt ans, dans l'étude des rayonnements.

M. Gustave Le Bon appela l'attention sur diverses expériences curieuses, dont il vient de reprendre la description dans un volume appartenant à cette collection, en exposant ses idées sur la généralité des dissociations atomiques. M. Henri Becquerel, peu de temps après la découverte de M. Röntgen, reconnut que l'uranium et les sels d'uranium émettent des rayons invisibles impressionnant la plaque photographique et rendant l'air qu'elles traversent conducteur de l'électricité ; il fut établi qu'elles traversent le papier noir, les métaux, qu'elles ne se réfléchissent ni ne se réfractent. Enfin, ce qui est le plus surprenant, c'est que l'émission des rayons est spontanée : elle n'est produite par aucune cause excitatrice connue ; elle se conserve, en dépit des combinaisons chimiques, et l'origine de l'énergie mise en jeu fut l'objet de longues discussions. D'autres corps jouissent des mêmes propriétés que l'uranium. La *radio-activité*, mesurée par la vitesse de décharge d'un condensateur électrique, est beaucoup plus grande dans certains minerais naturels d'uranium et de thorium que dans l'uranium lui-même et les minerais correspondants préparés artificiellement. M^me^ Curie en a conclu que les minerais naturels, d'activité anormale, renferment des traces de substances nouvelles très fortement radio-actives. Cette remarque fut le point de départ de recherches mémorables entreprises par M. et M^me^ Curie, avec la collaboration de M. Bémond, qui conduisirent à

admettre l'existence de deux nouvelles substances, l'une le *polonium* précipité dans les combinaisons chimiques avec le bismuth, l'autre le *radium* précipité avec le barium.

La découverte du radium a été confirmée par l'analyse spectrale, et on a pu fixer approximativement le poids atomique de ce nouveau corps qui forme le dernier terme de la série des métaux alcalino-terreux. La remarquable méthode de recherches inaugurée par M. et M^me^ Curie, a permis à M. Debierne de découvrir un autre élément, l'*actinium*, analogue au thorium, dont il est difficile à séparer, et permettra, sans doute, de découvrir encore d'autres éléments jumeaux d'éléments déjà connus. Une grande difficulté de ces recherches est qu'un élément inactif par lui-même peut devenir actif lorsqu'il est exposé, pendant un temps suffisant, aux rayons du radium ou de substances analogues ; ce phénomène de radio-activité induite est d'ailleurs temporaire.

L'étude des radiations, analogues à celles de l'uranium, et que l'on désigne aujourd'hui sous le nom de *rayons de Becquerel*, a fait l'objet d'un nombre immense de travaux en France, en Allemagne et en Angleterre. Il en résulte que ces rayonnements sont formés de rayons de trois espèces. Ceux de la première espèce qu'on appelle les rayons $\gamma$ sont analogues aux rayons *X*. Ceux de la deuxième les rayons $\beta$ sont analogues aux rayons cathodiques, ils sont déviés par l'aimant et sont chargés d'élec-

tricité négative de telle sorte que les corps radio-actifs dégagent spontanément, et d'une façon continue, de l'électricité; la vitesse du bombardement cathodique des rayons β est énorme et peut, dans certains cas se rapprocher de la vitesse de la lumière. Enfin une troisième espèce de rayons, les rayons α, sont déviés dans un champ magnétique en sens inverse des rayons cathodiques et par suite chargés d'électricité positive; ils ont une vitesse moindre que les rayons β.

Rappelons encore un des chapitres les plus mystérieux des nouveaux rayonnements, celui de l'émanation qui se dégage des corps radio-actifs et communique temporairement aux autres corps des propriétés radio-actives; cette émanation est d'ailleurs liée à la présence de la matière et se transmet par les gaz. De plus, les solutions des sels de radium dégagent d'une manière continue un mélange d'hydrogène et d'oxygène contenant de l'*hélium* d'après MM. Ramsay et Soddy; cet hélium est regardé comme résultant de la désagrégation de l'atome de radium. Enfin, les sels de radium sont spontanément lumineux : le chlorure de radium sec émet une lumière assez intense pour qu'on puisse lire dans l'obscurité.

Au point de vue purement théorique, l'intérêt des nouvelles substances est très grand; il réside dans les propriétés extraordinaires du rayonnement spontané de ces substances. Les discussions soulevées à ce sujet touchent aux bases mêmes de la science,

au principe de la conservation de l'énergie, au principe de Carnot, à l'invariabilité de l'atome, à la nature de la matière. A la vérité, ces difficultés paraissent moins grandes aujourd'hui, car au moins en considérant la partie des nouveaux rayonnements assimilables aux rayons cathodiques, il semble qu'il y ait une émission de matière si on adopte les idées développées plus haut. D'ailleurs, cette émission est tellement faible qu'elle ne peut être contrôlée par une perte de poids, puisque d'après les premiers physiciens qui se sont occupés de cette question, elle serait d'un milligramme par centimètre carré de surface rayonnante en un milliard d'années. Quoique ces nombres soient très exagérés et aient été récemment réduits, il n'y a, dans ces conditions, aucune contradiction avec le principe de la conservation de l'énergie, mais alors il faut admettre que l'atome chimique n'est pas un édifice immuable et se désagrège en *sous-atomes* radiants. On peut expliquer par cette dislocation les dégagements de chaleur observés par Curie et aussi le fait qu'un sel de radium enfermé dans un tube scellé, prend une charge d'électricité positive, les rayons négatifs $\beta$ sortant du tube et les rayons $\alpha$ étant arrêtés. Quant au principe de Carnot, on ne sait vraiment pas à quoi s'adresser, pour l'appliquer, au milieu de ces dislocations atomiques, et le mieux est de n'en pas parler à cette occasion. On voit que la découverte des rayons de Becquerel et de Curie n'intéresse pas

moins la chimie que la physique, et que les diverses radiations, dont nous venons d'esquisser l'histoire pourraient modifier nos idées sur plus d'un point fondamental ; elle a donné aussi une vive impulsion à une théorie dont nous allons parler dans un moment, celle des électrons.

Pour ce qui concerne les applications, les corps radiants sont des auxiliaires utiles dans les laboratoires de physique. Leur propriété de rendre l'air conducteur de l'électricité est déjà fréquemment utilisée ; on peut aussi faire des radiographies en utilisant ces corps. En chimie, les études à faire sont nombreuses : le radium provoque des actions chimiques énergiques, comme la transformation du phosphore blanc en phosphore rouge. Enfin, des applications industrielles sont à prévoir. On pourrait, par exemple utiliser un jour, pour l'éclairage, une substance aussi spontanément lumineuse que le radium ; une révolution se prépare peut-être ainsi dans les moyens d'éclairage. On mesure le progrès qui se trouverait réalisé quand on pense qu'aujourd'hui nous ne savons mettre en mouvement l'éther, pour produire des vibrations lumineuses, qu'en chauffant des corps matériels, ce qui ne donne, en énergie utilement rayonnée, qu'un rendement très faible. Toutefois, la production de lumière sans chaleur jusqu'ici réalisée seulement, semble-t-il, par certains insectes ne serait pas réalisée par le radium, comme on avait pu l'espérer un moment, puisqu'un gramme de

radium émet par heure, d'après Curie, cent calories. La rareté et le prix élevé du radium rendent d'ailleurs impraticable actuellement les applications, en dehors de celles qui touchent à la médecine.

On parle beaucoup, depuis quelque temps des *électrons* et de la mécanique à laquelle conduit leur théorie. Il n'est pas facile en quelques lignes de faire comprendre en quoi consiste cette mécanique nouvelle, où il est question de masse dépendant de la vitesse et où on discute si cette masse est tout entière d'origine électro-magnétique. Reprenons la particule électrique du tube de Crookes et regardons-la comme se mouvant dans l'éther immobile. On sait que dans celui-ci les composantes de la force électrique et de la force magnétique en chaque point satisfont aux six équations de Hertz, et l'énergie électro-magnétique pour une variation du champ est posée égale à la variation d'une certaine intégrale triple étendue à tout l'espace, intégrale où figure la somme des carrés des six composantes des champs électrique et magnétique. Rappelons-nous aussi que, conformément à l'expérience célèbre de Rowland, un corps électrisé en mouvement crée un champ magnétique, de telle sorte que le mouvement de la particule va modifier l'état de l'éther; ces variations pourront être étudiées en se servant des équations de Hertz. Si le mouvement de la particule est uniforme, les variations se réduisent à un transport de même direction et à un sillage électromagnétique

accompagnant le point. Il n'y a pas alors de variation dans l'énergie telle qu'elle a été définie plus haut; mais la création du sillage exige une certaine quantité d'énergie, différence entre l'énergie électromagnétique totale du sillage et l'énergie électrostatique de la particule au repos. Or, dans le cas d'une particule sphérique, le calcul donne pour cette quantité d'énergie une formule simple où figurent la charge électrique $e$, le rayon de la sphère, et le rapport de la vitesse $v$ de la particule à la vitesse V de la lumière. Si ce rapport est petit, la formule peut être réduite à son premier terme qui est de la forme $mv^2$. On a alors une énergie cinétique de même forme que dans la mécanique classique; le coefficient $m$ que l'on peut appeler la masse électromagnétique, s'exprime à l'aide de la charge $e$, du rayon de la sphère et de la vitesse de la lumière V. Quand le rapport $\frac{v}{V}$ n'est pas très petit, on peut toujours mettre l'énergie sous la forme $mv^2$, mais alors $m$ dépend de la vitesse $v$, et la formule montre que $m$ grandit indéfiniment à mesure que $v$ se rapproche de V. Il semble que nous soyons bien loin des substances radio-actives avec ces considérations, où les équations différentielles de Hertz jouent un rôle peut être trop grand pour plus d'un lecteur. Nous avons dit plus haut qu'au moyen des déviations des rayons cathodiques dans un champ électrique et dans un champ magnétique, on avait pu mesurer la

vitesse $v$ de la particule et le rapport $\frac{e}{m}$ de sa charge à sa masse. D'ailleurs dans ce calcul on s'appuie sur les formules ordinaires de la mécanique, les forces provenant des lois classiques de l'électricité et du magnétisme. Les substances radio-actives, comme le radium, permettent de refaire avec les rayons β les mêmes expériences dans des conditions plus larges, notamment avec des vitesses $v$ beaucoup plus grandes. Comme la charge $e$ est invariable dans toutes les expériences, ou du moins est regardée non sans raisons comme telle, on a pu comparer les variations des valeurs de $m$ résultant des expériences précédentes avec celles que donne la formule théorique dont j'ai parlé tout à l'heure ; la concordance est satisfaisante, et c'est ainsi qu'on a conclu que l'inertie de la particule est tout entière d'origine électro-magnétique. Il est permis de garder peut-être quelque doute à l'endroit de ce résultat, les expériences étant loin d'avoir, surtout quand $v$ se rapproche de V, la précision que l'on exige en physique sur des points qui touchent aux principes fondamentaux de la science. Admettons-le toutefois, avec d'éminents physiciens. Ce que nous avons appelé jusqu'ici du mot un peu vague de particule, a donc une masse tout entière d'origine électro-magnétique : c'est un atome d'électricité, un *électron;* il s'agit ici d'électron *négatif*. On n'a pas de renseignements précis sur les particules positives qui

transportent les rayons $\alpha$ du radium; y a-t-il des électrons *positifs*, de masse purement électromagnétique? C'est à quoi on ne peut répondre actuellement.

Je suis loin d'ailleurs d'avoir effleuré toutes les questions qui se posent dans cette nouvelle mécanique. J'ai parlé simplement de la masse; il faudrait distinguer une masse longitudinale et une masse transversale, mais celle-ci intervient seule jusqu'ici dans les conditions expérimentales habituelles. Ne nous troublons pas trop d'ailleurs de ce que la masse varierait avec la vitesse; jusqu'à cent mille kilomètres par seconde, cette variation serait négligeable, et ce n'est pas là une vitesse courante dans la mécanique appliquée.

Quoiqu'il en soit, une théorie de la matière, sinon entièrement nouvelle, du moins orientée d'une manière plus précise a été édifiée récemment en prenant pour base la considération des électrons. On y conçoit la matière comme constituée d'électrons positifs et d'électrons négatifs; elle devient ainsi de l'électricité en mouvement. Il serait prématuré d'émettre un pronostic sur l'avenir de ces vues hardies[1], qui choquent d'autant plus certaines personnes qu'elles croient mieux connaître la matière que l'électricité.

1. On trouvera des vues plus hardies encore dans le volume de Gustave Le Bon, paru dans cette collection, sur l'*Évolution de la Matière*, où on voit la matière se résoudre en éther par dissociations atomiques.

# CHAPITRE V

## La Physique de la matière et la Chimie.

I. Physique moléculaire et Chimie physique. — II. L'Énergétique et la Chimie. — III. Chimie organique et Chimie minérale.

---

### I

### PHYSIQUE MOLÉCULAIRE ET CHIMIE PHYSIQUE

Les recherches d'optique et d'électricité, dont nous venons de parler, offrent un exemple de la première tendance précédemment signalée, où le physicien cherche une explication mécanique des phénomènes qu'il étudie. Dans les remarques que nous avons présentées plus haut, on a vu que toute une partie de la science de notre époque s'oriente dans une autre direction; comprenant dans un autre sens le mot explication, on se propose seulement de rechercher des relations numériques générales entre les grandeurs dont, au moins pour le moment, on ne discute pas la nature.

Nous avons déjà parlé de l'énergétique, et nous aurons à revenir bientôt sur ses applications à la chimie et à la physico-chimie, dont beaucoup rentrent dans la seconde tendance. Mais, en fait, il est rare que celle-ci puisse se développer dans toute sa pureté; chemin faisant, les hypothèses cinétiques, atomiques ou autres s'introduisent presque nécessairement et sont fécondes pour la découverte.

Arrêtons-nous d'abord sur cette partie de la physique de la matière et de la chimie physique où les hypothèses cinétiques et atomiques ont permis d'édifier de vastes théories. Des travaux importants relatifs à la physique moléculaire ont suggéré des vues générales. On a considéré pendant longtemps les états d'agrégation principaux de la matière comme des états bien distincts; les états solide, liquide, gazeux étaient regardés comme possédant des propriétés caractéristiques, qui ne laissaient aucune incertitude sur leur distinction en trois états. Depuis les premières recherches de Faraday sur la liquéfaction des gaz, les relations entre l'état gazeux et l'état liquide ont été mises en lumière par de nombreuses recherches. La découverte du point critique pour un gaz a été capitale. Des études théoriques et expérimentales ont été consacrées à la recherche de la relation, devant pour chaque gaz être substituée à la loi de Mariotte, entre le volume spécifique, la pression et la température; les travaux théoriques de M. van der Wals sur ce sujet resteront célèbres, ainsi que sa loi des états correspondants, d'après laquelle cette relation est la même pour tous les corps, quand on rapporte la pression, le volume et la température à leurs valeurs au point critique. A la vérité, les expériences de M. Amagat et de M. Mathias ont montré que la loi précédente n'avait pas toute la généralité d'abord admise, mais elle conserve toute sa valeur,

quand on range les corps en différents groupes, et elle reste ainsi un fécond instrument de classement. Les recherches sur la statique des fluides à basse température et sur la continuité de la matière à l'état liquide et à l'état gazeux ont joué un rôle important dans la question de la liquéfaction des gaz. Il suffira de rappeler que, depuis 1878, M. Cailletet et ensuite MM. Pictet, Wrobleski, Olzewski, liquéfièrent l'air, l'azote, l'oxygène. En 1898, la machine de M. Linde a fait de la liquéfaction de l'air à 190 degrés au-dessous de zéro une opération industrielle, et M. Claude a récemment construit des machines fondées sur un principe un peu différent, en ce sens qu'il effectue la détente de l'air avec travail extérieur, tandis que le physicien allemand effectue la détente sans travail extérieur. L'hydrogène lui-même vient enfin d'être liquéfié par M. Dewar. L'hélium seul n'a pu être liquéfié, c'est le plus permanent de tous les gaz connus, et le gaz idéal de la thermométrie pour la mesure des basses températures. Le thermomètre à hélium a été utilisé avec succès jusqu'à *cinq* degrés du zéro absolu, la plus basse température atteinte jusqu'ici.

Des expériences nombreuses ont été faites sur les déformations permanentes des solides; entre autres conclusions, la déformation permanente d'un solide paraît constituée par des glissements qui se produisent, d'après le commandant Hartmann, dans

des plans faisant avec la direction de la traction un angle fixe. Les solides possèdent des propriétés longtemps regardées comme caractéristiques de l'état liquide : ils s'écoulent et ils peuvent se diffuser les uns dans les autres de manière à donner des solutions solides. Ces analogies, dont on pourrait allonger la liste, entre les liquides et les solides conduisent à penser que, de même qu'il y a continuité entre l'état liquide et l'état gazeux, il doit y avoir une continuité analogue entre l'état solide et l'état liquide. La question est très délicate. Certains corps, comme le verre, sont susceptibles de fusion pâteuse, et il y a alors un passage continu de l'état solide à l'état liquide. D'autre part, quand un corps est cristallisé, on ne peut *a priori* affirmer qu'il n'est pas possible de passer, d'une manière continue, de l'état solide à l'état liquide sans éviter la discontinuité de la fusion ; car, si étrange que cela paraisse, on connaît aujourd'hui des liquides biréfringents, c'est-à-dire cristallisés. Il semble cependant, d'après les vues développées par M. Le Châtelier et les expériences de M. Tamman, que le passage continu n'est pas possible de l'état solide à l'état liquide quand un seul de ces états est cristallin, l'autre étant amorphe. Il y aurait donc une différence très grande entre les passages de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état gazeux. De tels problèmes sont d'un intérêt considérable, touchant à l'essence même de la matière, et les physiciens

cristallographes s'engagent aujourd'hui avec ardeur dans ces recherches.

Dans la physique moléculaire, la théorie cinétique de la matière a donné lieu à de grands développements. Après avoir eu, avec Clausius et Maxwell, une grande vogue, elle a paru quelque temps frappée de discrédit. On ne voit pas actuellement ce qui pourrait remplacer les hypothèses cinétiques et rendre compte, pour prendre un exemple, d'un phénomène comme la diffusion. Pour les gaz, la théorie cinétique explique divers faits importants, elle a même conduit à prévoir que le frottement intérieur est indépendant de la pression. Des calculs audacieux, s'appuyant sur diverses expériences, ont permis d'obtenir la vitesse moyenne des molécules à une température donnée : ainsi les molécules d'hydrogène ont, à zéro degré, une vitesse moyenne de 1840 mètres. Les théories cinétiques de la matière reprennent faveur aujourd'hui; elles n'ont pas été moins fécondes dans l'étude des liquides que dans celle des gaz.

La distinction entre la physique et la chimie a été longtemps absolue; les questions traitées n'avaient rien de commun et les points de vue y étaient entièrement différents. Peu à peu les sphères de contact ont apparu. La loi de Dulong et Petit sur les chaleurs spécifiques, d'après laquelle les atomes de tous les corps simples ont la même capacité calorifique; la loi de Faraday, énonçant que l'action

chimique d'un courant électrique est la même sur la molécule d'un sel quelconque, peuvent être citées, entre bien d'autres, comme les conclusions d'études à la fois physiques et chimiques. Depuis vingt ans, on parle couramment de chimie physique, et une science, en quelque sorte nouvelle, s'est constituée : toutes les grandes universités possèdent aujourd'hui des chaires de chimie physique. Celle-ci n'a pas tardé à voir se développer dans son sein des points de vue assez différents. Les uns la regardent particulièrement comme une application à la chimie des lois générales de l'énergétique, en réduisant au minimum les hypothèses explicatives; d'autres, au contraire, plus aventureux n'ont pas craint d'édifier, en outre, des théories audacieuses, dont la discussion quelquefois passionnée donne actuellement à cette partie des sciences physiques une vie extrêmement intense.

Une partie importante de la chimie physique est dominée par les hypothèses moléculaires et atomiques, qui sont à la base de la chimie moderne. L'étude de l'abaissement du point de congélation des dissolutions a conduit Raoult aux lois célèbres qui portent son nom, et les mesures *cryoscopiques* sont maintenant usuelles en chimie. Chacun sait qu'un liquide contenant en dissolution des matières étrangères se congèle à une température plus basse que quand il est pur : l'étude des phénomènes de ce genre constitue la cryoscopie. Un résultat fonda-

mental est que, pour un même liquide, l'abaissement du point de congélation ne dépend que du nombre, et nullement de la nature des molécules dissoutes. Il y a, toutefois, des exceptions à cette loi; si elle est exacte pour les dissolutions des corps organiques dans l'eau, elle cesse de l'être pour les sels minéraux. D'une manière générale, elle ne s'applique pas aux solutions électrolytiques, c'est-à-dire qui laissent passer l'électricité; mais, pour les physico-chimistes, l'exception, suivant le vieil adage, a confirmé la règle. Il y a, suivant eux, pour les molécules dissoutes une dissociation plus ou moins complète et, en particulier, pour les solutions très étendues, la loi reparait dans toute sa simplicité à condition de donner au mot de molécule un sens convenable; nous reviendrons bientôt sur cette idée en parlant de l'hypothèse des *ions* qui joue un rôle si important dans la chimie physique. Le nom de Raoult restera aussi attaché à la *tonométrie*, c'est-à-dire l'étude des vapeurs émises par les solutions. La présence d'une matière dissoute élève le point d'ébullition de la solution et diminue la tension de vapeur du dissolvant. Ici encore le nombre seul des molécules, et non leur nature, intervient. Le dissolvant restant le même en quantité et qualité, la diminution de la tension de vapeur est proportionnelle au nombre des molécules dissoutes : telle est la loi des concentrations moléculaires de Raoult.

Toutes ces études sont liées étroitement à la ques-

tion de la pression osmotique dans les dissolutions. L'attention avait été appelée jadis, par Dutrochet, sur l'importance des phénomènes d'osmose dans la vie végétale, mais c'est par les travaux de M. Pfeffer que ces notions, d'abord un peu vagues, se précisèrent, cela surtout grâce à l'artifice de la membrane semi-perméable donnant libre passage à l'eau et arrêtant les corps en dissolution. La pression osmotique est, en quelque sorte, la part de pression dans la dissolution due aux molécules dissoutes ; il est facile de la définir, avec précision, d'une manière purement expérimentale. La loi fondamentale de l'osmose est que, sauf certaines exceptions, toute molécule, quelle que soit sa nature, exerce en dissolution la même pression osmotique ; celle-ci est donc proportionnelle au nombre des molécules réparties dans un volume donné. Nous retrouvons les mêmes propriétés moléculaires, et des études plus complètes, tant théoriques qu'expérimentales, ont montré les liens étroits entre les phénomènes osmotiques, la cryoscopie et la tonométrie. Dans ces recherches, les principes fondamentaux de l'énergétique sont constamment appliqués ; reconnaissons que, avec les raisonnements actuellement employés, il est nécessaire de faire usage de certains postulats plus ou moins avoués, en particulier l'existence de parois semi-perméables laissant passer tels corps, mais imperméables pour tel autre. Mais la jeune école de physico-chimie a la foi qui trans-

porte les montagnes, et bien des découvertes ont justifié ses audaces. L'assimilation faite par M. van T. Hoff entre la pression osmotique dans les solutions et la pression dans les gaz, qui le conduisit à étendre aux solutions l'équation caractéristique des gaz, a été très féconde. Merveilleuses aussi sont, dans leur simplicité, ces formes de démonstrations où intervient le principe de Carnot, comme pour le gaz, et, avec lesquelles, par exemple, on établit *a priori* la nécessité de l'abaissement de la tension de vapeur émanée d'une solution. Quoi qu'il puisse advenir de certaines interprétations, des faits d'une importance capitale ont été mis en évidence. Ils intéressent la chimie comme la physique, car la théorie des pressions osmotiques revient, en somme, au problème des équilibres chimiques; ils intéressent aussi les sciences de la vie, car l'osmose intervient dans les rapports de la cellule vivante avec le milieu ambiant. Depuis vingt ans, le rôle biologique de la force osmotique a été mis en évidence; il faut citer au moins à ce sujet les belles recherches de M. de Vries, en physiologie botanique, sur la turgescence des cellules et les coefficients d'isotonie.

Nous avons vu que, dans certains cas, les lois de Raoult cessent d'être exactes, et il en est de même pour celles qui concernent les pressions osmotiques. Ainsi, pour la majorité des sels dissous dans l'eau, les pressions sont plus fortes qu'il ne faudrait : elles

ne correspondent pas au nombre des molécules qui paraissent exister dans la solution, mais à un nombre plus grand. Ainsi une solution très étendue de sel marin se comporte, par rapport à la loi de Raoult, comme si elle renfermait un nombre de molécules de chlorure de sodium double de celui qu'elle contient. M. Arrhenius émit l'idée hardie qu'il y avait là un phénomène de dissociation, et qn'en général dans les solutions de sels, d'acides ou de bases dans l'eau il y a des molécules dissociées en grand nombre, celui-ci étant d'autant plus grand que la solution est plus étendue : c'est la dissociation électrolytique, et on donne le nom de *ions* aux éléments électrolytiques. De plus, en vue d'expliquer l'action des courants sur les solutions, on suppose que les *ions* portent une charge électrique ; ainsi les *ions* chlore et les *ions* sodium dans une dissolution de sel marin sont chargés respectivement d'électricité négative et d'électricité positive. Ces vues, au premier abord étranges, sont loin d'être admises par tous les chimistes, quelques-uns étant gênés de voir que l'ion positif hydrogène et l'ion négatif hydrogène possèdent des propriétés si différentes de celles que nous connaissons à l'hydrogène et au chlore. Diverses expériences semblent cependant bien montrer la réalité d'un double mouvement matériel pendant le passage d'un courant dans une solution, et il ne semble pas qu'aucun fait précis leur ait été opposé. Les nouvelles

hypothèses ont réussi, au contraire, à grouper autour d'elles un grand nombre de faits épars ; combinées avec les lois de la thermodynamique, elles ont été l'origine d'une théorie importante qui a fait prévoir des faits nouveaux, éclairé le mécanisme de nombreuses réactions chimiques et fourni même une représentation de la manière dont se produisent les forces électromotrices qui faisait l'objet de discussions depuis l'époque de Galvani et Volta. Il importe peu, d'ailleurs, qu'une théorie choque ou non nos habitudes; c'est un point sur lequel il est inutile d'insister après ce que nous avons dit sur la façon dont on doit envisager les théories physiques. En pressant un peu la théorie des *ions*, on a été conduit à penser que les charges de tous les *ions* sont des multiples de la charge portée par l'*ion* d'hydrogène; nous savons, comme il a été dit dans le chapitre précédent, que les physiciens vont aujourd'hui beaucoup plus loin dans la dissection de la matière. Remarquons-le encore une fois : il est singulier de voir reparaître partout des théories d'émission, alors que les théories ondulatoires semblaient assurées d'un triomphe définitif. *Habent sua fata theoriæ!* Je dois ajouter toutefois qu'il est des chimistes n'aimant guère ces vues hypothétiques, et que, par exemple, pour plusieurs d'entre eux, certains faits visés plus haut pourraient être expliqués, en niant la dissociation électrolytique et en admettant, au contraire,

la polymérisation de la molécule d'eau ; mais, quoi qu'il en soit de l'avenir des théories électrolytiques, on ne peut nier qu'elles aient provoqué un mouvement expérimental considérable, ce qui est le point essentiel. La physiologie et la médecine se sont emparées aussi de la conception nouvelle et en ont tiré un heureux profit; nous aurons l'occasion d'y revenir.

## II

### L'ÉNERGÉTIQUE ET LA CHIMIE

Nous venons de jeter un coup d'œil sur une direction des recherches de chimie physique, où interviennent de nombreuses hypothèses ayant pour objet de faire pénétrer dans le mécanisme intime des phénomènes. Une autre partie essentielle de la chimie physique consiste dans les applications de l'énergétique à la chimie, en ne s'appuyant sur aucune hypothèse explicative, mais seulement, quand il est nécessaire, sur les lois expérimentales relatives à chaque catégorie de phénomènes. Elle s'est surtout développée sous l'influence des travaux de W. Gibbs, aux États-Unis, et de Helmholtz, en Allemagne. Sa caractéristique est de mettre en évidence l'aptitude de chaque système à entrer en action, ce que Sadi Carnot appelait la puissance motrice, Helmholtz l'énergie libre, et ce que

M. Duhem appelle le potentiel thermodynamique : cette fonction, en particulier, joue dans l'étude des équilibres chimiques le même rôle que le potentiel en mécanique rationnelle.

Les travaux de Helmholtz *sur la Thermodynamique des phénomènes chimiques*, quoique moins importants que ceux de Gibbs et un peu postérieurs, ont eu, au début, plus de retentissement. Les mémoires du savant américain sont restés pendant quinze ans à peu près inconnus, jusqu'au jour où M. van der Waals en a fait comprendre l'importance aux chimistes hollandais. Depuis lors, les idées de Gibbs se sont rapidement répandues en Hollande à la suite des travaux de M. Bakhuis Rozeboom et de ses élèves ; en Allemagne, de MM. Ostwald et Nernst ; aux États-Unis, de MM. Trevor et Bancroft ; en France, de MM. Duhem et Le Châtelier. Si la plupart des chimistes, adonnés à la chimie physique, s'inspirent aujourd'hui directement des idées de Gibbs, il s'est cependant produit, dans l'intervalle écoulé entre leur première publication et leur diffusion, un certain nombre de recherches indépendantes, comme celles de M. van T. Hoff et de M. Le Châtelier, dont les résultats considérés alors comme nouveaux ont contribué aux progrès de la science. On a reconnu, depuis, que les plus importants d'entre eux étaient contenus implicitement dans l'œuvre du savant américain.

L'introduction de l'énergétique en chimie a rendu

deux ordres de services également importants. Elle établit d'abord entre certaines grandeurs mesurables des relations nécessaires que l'expérimentation abandonnée à elle-même serait sans doute bien longue à reconnaître ; elle donne, en second lieu, des procédés rationnels de classification pour les faits observés. Le premier de ces services se comprend aisément. Le second est peut-être plus important encore : il permet d'augmenter considérablement, si je puis dire, le rendement scientifique de l'expérimentation, en faisant ressortir des analogies qui auraient pu longtemps échapper.

Parmi les découvertes de Gibbs, une des plus importantes est la célèbre *loi des phases*. Cette loi groupe tous les phénomènes d'équilibre chimique avec une clarté que l'on croyait impossible à atteindre; elle a permis de se reconnaître dans l'étude expérimentale de systèmes très complexes que l'on n'aurait jamais songé autrefois à aborder. Parmi les recherches importantes qu'elle a facilitées, on peut citer l'étude des équilibres complexes entre les différents sels de l'eau de mer, et les études sur les alliages métalliques, questions dont l'intérêt industriel égale l'importance scientifique. Cette loi établit des relations nécessaires entre le nombre des phases, c'est-à-dire des différentes masses homogènes existant dans un système en équilibre chimique et celui des composants indépendants intervenant dans la réaction d'équilibre envisagée. On

obtient cette loi, sans qu'il soit besoin d'aucun calcul, en rapprochant le nombre des paramètres nécessaires pour définir l'état d'un système de corps du nombre des relations qu'établit entre ces paramètres la condition d'équilibre. Dans un système en équilibre, le nombre $r$ des phases ne peut dépasser de plus de *deux* unités le nombre $n$ des constituants du système. Quand $r = n + 2$, l'équilibre ne peut exister qu'à une seule pression et à une seule température; le système est dit alors invariant, tel est le cas d'un système renfermant de l'eau sous chacun des trois états de glace, de liquide et de vapeur. Un système est monovariant, si $r = n + 1$ : pour l'équilibre, on peut alors se donner arbitrairement soit la température, soit la pression; ainsi pour une température donnée, il y a une tension de transformation, et le type le plus simple d'un système monovariant est fourni par un liquide surmonté de sa vapeur. Cette classification se poursuit, et tous les systèmes chimiques qui appartiennent à une même catégorie présentent de nombreuses analogies. La connaissance des cas simples, où les constituants sont peu nombreux, permet d'aborder l'étude des cas complexes similaires.

Les équilibres chimiques, dont nous avons la connaissance expérimentale, sont des équilibres stables, c'est-à-dire que si on écarte un tel système de son état d'équilibre par l'intervention d'une action exté-

rieure, il tend à revenir à son état initial, une fois l'action extérieure supprimée. Cette stabilité de l'équilibre entraîne en chimie, comme en mécanique, certaines relations entre les grandeurs caractéristiques du système. Ces relations présentent une importance capitale ; elles permettent de prévoir le sens du déplacement de l'équilibre sous l'influence d'un changement de pression, de température, etc. Cette loi, partiellement énoncée par M. van T. Hoff, sous le nom d'équilibre mobile de température, a été présentée sous sa forme générale par M. Le Châtelier, sous le nom de principe d'opposition de l'action à la réaction : elle avait été établie antérieurement, dans toute sa généralité, par Gibbs. Une des conséquences de cette loi est que tout changement de température tend à déplacer l'équilibre dans un sens tel que la chaleur mise en jeu dans la réaction provoque une variation inverse de la température : ainsi une élévation de température provoque une réaction avec absorption de chaleur. Il en est de même pour ce qui concerne la pression, la force électromotrice, la masse des corps en réactions. Cette loi si générale, qui avait échappé aux expérimentateurs, leur est aujourd'hui d'un grand secours. Elle coordonne toutes les anomalies que semblait présenter la variation de la stabilité avec la température. Il en résulte, en particulier, que les sels qui se dissolvent avec dégagement de chaleur présentent une solubilité décroissante à mesure que

la température s'élève ; la même loi nous apprend aussi que les composés chimiques fournis avec dégagement de chaleur sont d'autant plus stables que la température est plus basse, tandis que les composés endothermiques, comme l'acétylène, sont d'autant plus stables que la température est plus élevée.

Indépendamment de ces lois tout à fait générales, l'application de l'énergétique à la chimie a permis d'établir un certain nombre de lois plus restreintes en ce sens qu'elles s'appliquent à des points singuliers des phénomènes d'équilibre. Telles sont les lois relatives à l'influence de l'état des corps sur leur solubilité, particulièrement étudiées par M. Le Châtelier qui a démontré la nécessité de la multiplicité des courbes de solubilité et a basé sur ce fait la théorie de la prise du plâtre et des mortiers hydrauliques. Citons encore le théorème de Gibbs sur les maxima des courbes de solubilité, qui a rendu de grands services dans l'étude expérimentale des alliages et l'étude des points anguleux des courbes de solubilité dont la théorie fait connaître d'importantes propriétés.

Toutes les lois que nous venons de rappeler sont absolument rigoureuses, elles donnent des relations numériques entre les changements corrélatifs de pression et de température dans les systèmes en équilibre chimique, des relations qualitatives au sujet du changement des masses. Il existe un second

groupe de relations semblables qui n'ont plus la même rigueur, car elles s'appuient sur des lois expérimentales limites et visent parfois des corps fictifs comme les gaz parfaits dont les analogies avec les corps réels sont plus ou moins lointaines. Ces nouvelles relations, au point de vue théorique, doivent donc être classées bien loin derrière les premières; mais, au point de vue pratique du chimiste expérimentateur, leur intérêt est encore très grand. La plus importante de telles lois se rapporte à l'équilibre des systèmes gazeux, et donne une relation entre les variations simultanées de masse que l'on peut faire subir aux constituants d'un système gazeux en équilibre sans altérer cet état d'équilibre; elle a été établie pour la première fois par Gibbs en partant d'une hypothèse sur le potentiel des mélanges gazeux choisie de façon à satisfaire à certaines expériences de Regnault. Cette loi est aujourd'hui le guide de tous les expérimentateurs qui s'occupent de l'équilibre des systèmes gazeux homogènes; elle présente, au point de vue industriel, un intérêt capital en ce qui concerne les phénomènes de combustion du charbon et les phénomènes de réduction des minerais. Dans un ordre de recherches analogues rentrent les études de M. van T. Hoff sur l'équilibre des mélanges liquides homogènes; en faisant une hypothèse sur les pressions osmotiques pratiquement équivalente à la loi de Wüllner, l'illustre chimiste est arrivé à une formule générale

de l'équilibre des solutions diluées offrant une grande analogie avec celle des mélanges gazeux.

Ces exemples montrent l'importance énorme que prend l'application à la chimie des lois générales de l'énergétique. De ces applications, les unes ont un caractère tout à fait rigoureux, ou du moins offrant la même certitude que les lois fondamentales de la science de l'énergie ; d'autres s'appuient sur des lois expérimentales plus ou moins approchées. Les premières, ici comme en physique, sont en quelque sorte qualitatives ; dans les secondes, les formules rigoureuses ne sont pas suffisantes parce qu'elles renferment, outre les volumes, les pressions, des températures, les phases, les quantités de chaleur, toutes grandeurs accessibles à l'expérience, les potentiels qui échappent à nos mesures. Il faut éliminer ces potentiels pour arriver à des formules quantitatives utilisables par l'expérimentation. On ne le peut que dans certains cas particuliers, et, en général, l'élimination est impossible si l'on s'en tient aux principes généraux, et c'est alors que doivent intervenir certaines lois expérimentales.

L'idée féconde de l'équilibre chimique, qui joue un si grand rôle dans la science de notre époque, avait déjà, il y a longtemps, attiré l'attention de Berthollet. Plus tard, le travail célèbre de M. Berthelot sur l'éthérification, et les admirables recherches d'Henri Sainte-Claire Deville et de ses disciples sur la dissociation ont réellement créé la chimie

physique, en mettant en pleine lumière la notion de l'équilibre chimique. Il ne faut toutefois pas oublier qu'il est des équilibres d'une autre nature, ne correspondant pas à des transformations réversibles; ce sont les cas de repos chimique, comme les appelle M. Le Châtelier, ou de faux équilibres, comme on les désigne souvent avec M. Duhem. Ainsi, à la température ordinaire, l'oxygène et l'hydrogène ne se combinent pas: c'est là un faux équilibre. Le faux équilibre est comparable à l'équilibre d'un corps rugueux retenu par le frottement sur un plan incliné; il y a en chimie, au moins dans certaines conditions, des résistances passives jouant un rôle analogue au frottement et à la viscosité. Aussi longtemps qu'on a confondu les équilibres véritables et les faux équilibres, la confusion en mécanique chimique est restée inextricable; la distinction commence aujourd'hui à devenir familière. Les actions de présence et les nombreux procédés mis en œuvre pour réaliser les réactions ont pour effet d'annuler les résistances passives, de même que l'huile annule le frottement dans les machines. L'étude théorique des faux équilibres présente des difficultés considérables. On sait à combien de discussions donnent lieu en mécanique rationnelle les recherches faites depuis Coulomb sur le frottement, et il est clair que le problème de mécanique chimique est beaucoup plus général.

M. Duhem, dont les ouvrages et les travaux per-

sonnels ont exercé une réelle influence sur les recherches de mécanique chimique, s'est beaucoup occupé de la question des faux équilibres, qui ne comprennent pas seulement d'ailleurs des actions chimiques, mais des changements d'état physique et des modifications allotropiques. Il fait une distinction entre les faux équilibres apparents et les faux équilibres véritables. Les premiers rentrent dans les états d'équilibre prévus par les principes de l'énergétique, pourvu qu'on ajoute des termes habituellement négligés relatifs aux surfaces de contact des différentes phases; c'est ce qui arrive dans les retards d'ébullition, dans la sursaturation et la surfusion. Pour les faux équilibres réels au contraire, comme il arrive pour le frottement en mécanique, les conditions d'équilibre ne s'expriment pas par des égalités, mais par des inégalités. Dans ces cas, il peut y avoir des contradictions avec la loi des phases ou la loi du déplacement de l'équilibre, et, dans les représentations graphiques, des circonstances très diverses peuvent se présenter, quant aux dispositions relatives des régions de combinaison de décomposition et de faux équilibres. Il serait, je crois, prématuré de dire quel avenir est réservé à ces intéressantes tentatives de théorie dans un sujet singulièrement compliqué.

En résumé, l'importance de la nouvelle branche de la chimie qui doit son plein développement aux travaux de W. Gibbs est comparable à celle de la

chimie minérale créée par Lavoisier, de la chimie organique dérivée des travaux de Gerhardt; son influence, nous l'avons vu, se fait déjà sentir dans l'étude des problèmes industriels.

## III

### CHIMIE ORGANIQUE ET CHIMIE MINÉRALE

Nous venons d'insister sur cette partie de la chimie, qui a de nombreux points de contact avec la physique, et où les théories prennent les mêmes formes que dans cette dernière science. Dans d'autres parties de la chimie, le caractère explicatif est différent; le point de vue mécanique n'y joue actuellement aucun rôle ou à peu près, et l'explication y est surtout géométrique et schématique. Gardons-nons bien de faire peu de cas de ces constructions, au premier abord moins satisfaisantes : elles ont rendu et rendent, tous les jours, d'immenses services, dont la chimie organique peut donner tant d'exemples. On sait l'importance, en chimie organique, de la théorie atomique; elle découle de la théorie des types de Gerhardt et Laurent appuyée sur la notion de valence des éléments et, en particulier, sur la quadrivalence du carbone. Disséquant, pour ainsi dire, la molécule, elle a permis, tout d'abord, de la représenter par une image dans le plan, image qui figure la façon dont sont

reliés les uns aux autres les atomes de carbone, et de déterminer, en outre, auxquels de ces atomes de carbone sont attachées les fonctions que le corps soumis à l'analyse peut posséder. Pour arriver à une telle représentation, il faut, en dehors de la connaissance des analyses et des diverses réactions que le corps possède, avoir une idée exacte du nombre d'atomes contenus dans sa molécule, et par conséquent il faut connaître son poids moléculaire. Il n'y a pas bien longtemps encore, on ne possédait qu'une seule méthode pour déterminer les poids moléculaires : elle découlait de la loi d'Avogadro et d'Ampère, et elle était basée sur la détermination des densités de vapeur. Elle n'était donc applicable qu'aux corps capables de se volatiliser sans altération et était forcément d'un emploi restreint. Un autre procédé fut indiqué par M. Berthelot, basé sur la transformation du corps étudié en carbure saturé correspondant, carbure dont on pouvait déterminer ensuite le poids moléculaire par la méthode des densités de vapeur. D'autres méthodes sont aujourd'hui couramment employées; parmi elles, on doit surtout citer celles de Raoult, se déduisant de ses recherches sur la cryoscopie et la tonométrie, et basées, l'une sur le retard de la congélation d'un liquide tenant en dissolution un poids connu d'un corps solide ou liquide, l'autre sur la détermination de la diminution de la tension de vapeur d'un liquide tenant également en dissolution

un poids connu du corps dont on veut connaître le poids moléculaire. A côté de ces méthodes générales, il y a certaines méthodes employées dans des cas spéciaux, comme celles qui résultent des études de la vitesse du son dans les gaz ou vapeurs considérés, et de la variation du pouvoir osmotique.

Pendant de longues années, la chimie organique s'est contentée de représenter par une formule plane la constitution des corps. Il n'était sans doute dans la pensée de personne que cela représentait la forme de l'édifice isolé, mais c'était une première approximation montrant le nombre des atomes de carbone existant dans une chaîne, avec la façon dont ils étaient reliés les uns aux autres, et la manière dont les diverses fonctions se rattachaient aux atomes de carbone. Dans ces quinze dernières années, les chimistes organiques ont eu une prétention plus haute : ils ont voulu représenter le corps, dont ils avaient établi la constitution, par une formule qui montrât la situation des divers atomes dans l'espace, et la *stéréochimie* s'est développée. Celle-ci a pour point de départ les travaux cristallographiques de Pasteur, et a eu pour créateurs M. Le Bel et M. van T. Hoff.

Pasteur, en étudiant les acides tartriques, avait trouvé que tout corps actif sur la lumière polarisée possède une structure dissymétrique, et il avait conclu que, si le corps est actif en solution, c'est à

la dissymétrie de la molécule qu'il le doit. A l'époque où Pasteur fit ses travaux, on ne savait pas établir les formules de constitution des corps, c'est-à-dire la façon dont les différents atomes sont unis dans la molécule, et on ne pouvait avoir qu'un résultat en quelque sorte global. MM. Le Bel et van T. Hoff, presque simultanément et sous des formes différentes, énoncèrent ce fait qu'il suffisait qu'un corps contînt un carbone asymétrique pour qu'il pût posséder le pouvoir rotatoire, un carbone asymétrique correspondant dans la formule de constitution à un atome de carbone uni à quatre restes différents. Les deux chimistes passèrent en revue tous les corps répondant à cette donnée, et ils trouvèrent que tous, au moyen de procédés spéciaux, pouvaient acquérir une action sur la lumière polarisée. Ainsi Pasteur annonce qu'une molécule qui agit sur la lumière polarisée est un édifice dissymétrique; MM. Le Bel et van T. Hoff précisent en montrant qu'il suffit qu'une molécule possède un atome de carbone asymétrique. Il résulte de là que les corps ne peuvent être représentés que par une figure dans l'espace, et de là est née la stéréochimie. Utilisée d'abord par les inventeurs pour l'étude des corps ayant comme support de la dissymétrie le carbone, la méthode stéréochimique a été étendue par M. Le Bel à l'azote pentavalent, et elle a tout récemment été appliquée avec succès aux dérivés dissymétriques de l'étain et du soufre quadrivalents.

La forme de l'édifice moléculaire dans l'espace a même fait découvrir une nouvelle isomérie stéréochimique indépendante du pouvoir rotatoire et qui a été mise en lumière par les travaux de M. von Bæyer. Sans doute, les théories stéréochimiques ne laissent pas de prêter à quelques critiques, et la partie mécanique en est plus que rudimentaire. M. Le Bel insiste d'ailleurs avec raison sur l'hypothèse de la fixité relative des divers éléments de la molécule. Sans elle, il n'y a plus de stéréochimie : c'est ce qui semble arriver quand, par suite de diverses circonstances, comme l'élévation de température, la molécule vient à manquer de stabilité.

Les travaux de synthèse chimique sont d'une importance capitale, tant pour la théorie que pour la pratique. La synthèse de l'urée, faite par Wöhler à partir du cyanate d'ammoniaque, avait été suivie des célèbres procédés de synthèse à partir des éléments imaginés par M. Berthelot. Ils avaient créé une méthode nouvelle consistant à partir du simple pour aller au composé ; c'est dans cette voie, à la suite de M. Berthelot, que le monde chimique s'est engagé aujourd'hui. Mais il est indispensable, pour y marcher, d'avoir des guides : ces guides sont représentés par les théories, et, à ce point de vue, la stéréochimie s'est montrée très féconde. Les importants travaux de M. E. Fischer, qui n'ont pu être faits que grâce aux conceptions stéréochimiques, en donnent un remarquable exemple. Déjà l'on savait

que l'aldéhyde méthylique se condensait sous l'influence des substances alcalines pour donner naissance à des corps répondant à la formule du glucose, mais on n'avait pu isoler du mélange des espèces chimiques pures. M. Fischer, qui venait de découvrir la phénylhydrazine, l'appliqua à extraire du mélange des corps définis et il réussit à obtenir des corps cristallisés, des osazones. Il put ensuite, au moyen de ceux-ci, revenir par des chemins différents au sucre qui leur avait donné naissance et préparer ainsi synthétiquement la lévulose. Se basant sur les vues théoriques données par la stéréochimie, il a agrandi considérablement le cadre des sucres avec six atomes de carbone, et cette magnifique étude est, en chimie, l'une des plus remarquables de ces derniers temps.

Nous devons encore mentionner les tentatives heureuses faites pour reproduire un certain nombre de corps que nous offre la nature, parce qu'elles se rattachent aux vues théoriques de la situation des atomes dans l'espace. Les travaux sur le groupe des uréides ont conduit à la préparation artificielle de la caféine et de la théobromine, alcaloïdes du café et du cacao. Dans ce même groupe des alcaloïdes, on a établi la constitution de l'atropine et de la cocaïne, et on a réalisé une synthèse partielle de cette dernière; on a fait aussi la synthèse du principe odorant de l'essence de violettes, qu'on a désigné sous le nom d'ionone, et celle du principe odorant de l'iris.

On peut dire que toutes les synthèses chimiques sont abordables aujourd'hui. Elles seront d'autant plus vite réalisées que les chimistes travaillant dans cette voie auront à leur disposition les capitaux et les moyens dont dispose l'industrie; nous avons là un remarquable exemple d'une alliance entre l'industrie et des théories subtiles spéculant sur l'architecture des molécules.

A côté des vues et des idées théoriques qui guident le chercheur, les nouveaux réactifs contribuent grandement au progrès des sciences expérimentales. Ce ne serait point ici le lieu d'entrer dans des détails à cet égard. Cependant, parmi les réactifs nouveaux utilisés en chimie organique, il en est un d'un caractère général, et sur lequel nous aurons à revenir en biologie, je veux parler des ferments solubles retirés des plantes ou des animaux. On avait bien utilisé précédemment les microbes pour la préparation de certains composés chimiques, comme les acides lactique et butyrique, mais on n'entrevoyait pas de quelle façon ils opéraient. Les travaux de Büchner sur la levure de bière ont montré que ces microorganismes sécrètent une matière de nature albuminoïde, une zymase, qui, indépendamment de tout phénomène vital, est capable de dédoubler le sucre en alcool et en acide carbonique. La production de l'alcool est donc due à un phénomène chimique provoqué par une substance spéciale sécrétée par la levure, et c'est là un résultat d'un

intérêt considérable. Des ferments du même ordre, mais provoquant des oxydations ou des hydratations, ont été découverts, dans le suc de certaines plantes, par M. G. Bertrand et par M. Bourquelot. Il est vraisemblable que c'est aussi à des corps analogues qu'on doit attribuer les phénomènes d'oxydation produits par la bactérie du sorbose si bien étudiés par M. G. Bertrand. La mise en œuvre de ces ferments a déjà permis d'obtenir à l'état de pureté certains corps qu'on n'avait pu préparer jusqu'ici, et il est vraisemblable que leur emploi se généralisera.

Nous avons déjà assez souvent parlé des rapprochements entre les diverses branches de la science pour ne pas être étonné de la contribution apportée par la chimie organique à la chimie minérale. Indiquons à ce sujet quelques exemples. M. Fischer avait isolé une classe de dérivés organiques qu'il avait désignés sous le nom d'*hydrazines*; le point de départ de cette série est un hydrure d'azote l'hydrazine, $Az^2H^4$, dont la synthèse a été faite par des voies organiques avant de l'être par des procédés minéraux. M. Curtius a de même déduit des composés diazoïques l'azimide, $Az^3H$, qui a ensuite été obtenu au moyen d'une réaction minérale très simple. La chimie organique a dû ses progrès si rapides à la prévision des réactions, grâce aux formules de constitution. Leur introduction en chimie minérale, quoique moins aisée à cause de la diffi-

culté qu'on éprouve souvent à connaître la vraie condensation moléculaire, a été un grand avantage et a permis d'obtenir un grand nombre de composés nouveaux. Il n'est pas douteux que divers corps de la chimie minérale présentent des molécules complexes où certains groupements paraissent dissimulés, comme on l'observe dans les dérivés du chrome et du fer ; ces faits sont comparables à ceux qu'on observe en chimie organique. Citons encore à ce sujet l'étain capable d'éprouver une modification profonde qui le rend absolument méconnaisable, modification se produisant lentement au-dessous de vingt degrés et conduisant à ce que l'on appelle l'*étain gris* de moindre densité que l'étain blanc.

La notion de valence a été aussi en chimie minérale un guide fécond, né en grande partie des notions acquises en chimie organique et de l'extension, grâce à Raoult, des méthodes permettant de mesurer les poids moléculaires. La classification périodique de M. Mendeleef qui, malgré ses défauts, garde encore une grande valeur, classe les corps d'après leur valence maxima par rapport à l'oxygène. Ces valences maxima ne sont fréquemment pas utilisées dans leur totalité, et on a pu ainsi fort bien expliquer ces innombrables combinaisons, qu'on nommait autrefois d'addition, telles que les sels doubles. Leur nombre s'est beaucoup accru dans ces dernières années, à mesure qu'on établissait mieux leur constitution. Tels sont, par exemple, les

chlorhydrates de chlorure et les sels tétracuivriques de M. Sabatier ; tel est encore le trétrachlorure de plomb dû à la notion de la tétravalence du plomb établie par la chimie organique. On sait aussi quelle importance a eue la classification de M. Mendeleeff pour la découverte de nouveaux corps comme le germanium et le scandium.

Parmi les causes directrices des travaux les plus importants faits en chimie, on doit encore compter les perfectionnements des mesures physiques, et les moyens d'action puissants que les progrès de la physique ont mis à la disposition des chimistes. C'est la précision des mesures de densité qui a conduit lord Rayleigh à soupçonner dans l'azote atmosphérique un gaz plus lourd, non contenu dans l'azote de l'azotite d'ammoniaque, et qui, plus inerte que l'azote, a pu être séparé par l'action du magnésium au rouge : la découverte de ce nouveau corps dans l'air, l'*argon*, due à la collaboration de lord Rayleigh et de M. Ramsay, a eu un grand retentissement.

En ce qui concerne les nouveaux moyens d'investigation, la production des basses températures a devant elle un grand avenir. Grâce à la découverte du point critique et à l'application de la détente, le problème général de la liquéfaction des gaz a été résolu dans toute son étendue, sauf pour l'hélium, comme nous avons déjà eu l'occasion de le dire (page 177). La distillation frac-

tionnée de l'argon a fourni à M. Ramsay toute une série de gaz satellites, le crypton, le néon, le métargon, le xénon. Outre ces gaz, l'air atmosphérique renferme encore de l'*hélium*, ce gaz dont l'analyse spectrale avait d'abord révélé l'existence dans le soleil et que M. Ramsay avait découvert dans un minéral rare, la cléveïte ; la présence de l'hydrogène a été aussi signalée dans l'air que nous respirons, comme le montrent les récentes recherches de M. A. Gautier. D'après ce que nous en connaissons, la physique et la chimie des basses températures conduiront certainement à des résultats de la plus haute importance. C'est un fait bien curieux que l'accroissement indéfini de la conductibilité électrique des métaux, à mesure que la température décroît. Peut-être en est-il de même de la chaleur spécifique de certains corps? Aux températures extrêmement basses, les composés exothermiques ne peuvent se décomposer, tandis que les composés endothermiques ne peuvent se former. Comme on l'a dit sous une forme humoristique peu précise : le principe du travail maximum de la thermochimie est entièrement vrai au zéro absolu. Ceci revient à dire que, au-dessous d'une certaine température, variable avec les corps considérés, la réaction se passe dans le sens prévu par le principe ; aussi celui-ci est-il très souvent d'accord avec les faits aux températures ordinaires, tandis qu'il en est autrement aux températures élevées, où,

par exemple, l'acétylène prend naissance malgré l'absorption de chaleur.

La chimie des hautes températures n'est pas moins importante. Le four électrique résultant de l'arc voltaïque employé dans une enceinte close les réalise ; il a été entre les mains de M. Moissan, un outil incomparablement puissant. L'éminent chimiste a pu faire avec lui la synthèse du diamant, préparer un grand nombre de carbures métalliques, et, comme conséquence, obtenir par affinage, à l'état de pureté, des métaux seulement entrevus, comme l'uranium, le chrome, le manganèse, le tungstène et d'autres encore ; par l'action de l'eau sur le carbure de calcium s'est développée l'industrie de l'acétylène. Pour les théoriciens, la chimie des hautes températures est, nous l'avons vu plus haut, d'une importance capitale : c'est elle qui a amené l'avènement de la mécanique chimique nouvelle, appelant l'attention sur les phénomènes de dissociation.

L'emploi de l'électrolyse dans des conditions plus précises a été aussi un puissant moyen d'action. Il suffit de rappeler ici que, dans un appareil convenable et suffisamment refroidi, M. Moissan a obtenu le fluor libre, et, comme conséquence, une foule de dérivés dont un des plus curieux est le fluorure de soufre, gaz inerte, indécomposable par l'eau. Enfin l'emploi des métaux divisés ayant une très grande surface a été le point de départ de travaux importants. Des

réactions spéciales, qui ne se manifestent que très faiblement avec des lames, ont lieu facilement quand on remplace les lames par des poudres métalliques dont la surface est considérable : on a là une méthode générale pour la formation directe d'un grand nombre de composés.

Depuis longtemps déjà, on a montré que l'acide sulfurique peut être fabriqué par l'intermédiaire de la mousse de platine, l'acide sulfureux et l'oxygène se combinant ainsi directement, et ce procédé bouleversera sans doute quelque jour la préparation de l'acide le plus important pour l'industrie. On savait aussi que la mousse de platine provoque la réaction directe de l'hydrogène sur divers corps. Partant de là, M. Sabatier a, dans ces dernières années, créé de nouvelles méthodes générales d'hydrogénation directe par catalyse basées sur l'emploi des métaux divisés; le nickel, récemment réduit de son oxyde, donne des résultats particulièrement satisfaisants. M. Sabatier attribue cette action *catalytique* du nickel à la formation temporaire d'un hydrure de nickel instable, qui se fait et se défait constamment. Rien n'est plus curieux que ces réactions, et les exemples commencent à être nombreux, en chimie biologique comme en chimie pure, où une petite quantité d'une substance peut jouer un rôle utile pour ainsi dire indéfiniment.

# CHAPITRE VI

## Minéralogie et Géologie.

I. La Cristallographie et la Minéralogie. — II. La Géologie.

---

### I

### LA CRISTALLOGRAPHIE ET LA MINÉRALOGIE

Nous ne sortirons pas encore du domaine des sciences physiques en jetant un coup d'œil sur la minéralogie et la géologie, en laissant toutefois de côté, dans celle-ci, la paléontologie qui trouvera sa place dans un autre chapitre.

Grâce au concours des mathématiciens, les cristallographes ont pu élucider certaines propriétés en rapport immédiat avec la structure moléculaire des corps cristallisés. Il y a trente ans, Soncke et Mallard avaient déjà généralisé la conception de Bravais sur la structure de ces corps, en montrant que le principe de l'homogénéité était sauvegardé, en substituant aux molécules symétriques de Bravais des groupes de molécules asymétriques disposés symétriquement. Plus récemment, MM. Schœnflies et von Fedorow reprirent, en s'aidant des travaux de M. Jordan, la question au point de vue mathématique ; ils recherchèrent tous les types de groupes de mouvement d'ordre fini ; le groupement en systèmes de polyèdres correspondants, de manière à

remplir l'espace, épuise toutes les possibilités dans la recherche de la structure des cristaux (voir page 41). A vrai dire, quelques-uns seulement de leurs résultats sont à utiliser pour faire la théorie de toutes les propriétés découlant de la structure moléculaire. Dans cet ordre d'idées, les recherches de M. Wallerant ont élargi encore les cadres tracés par Haüy, et déjà successivement agrandis par Bravais et Mallard. Les groupes asymétriques de molécules, que M. Wallerant nomme particules fondamenlales, en se groupant entre elles au moyen de rotations autour d'axes de symétrie et de renversements par rapport à des plans de symétrie, donnent naissance aux particules complexes qui possèdent des éléments de symétrie proprement dits et des éléments de symétrie limites; les premiers se retrouvent dans les corps cristallisés, les seconds deviennent les éléments de symétrie des groupements cristallins. Mais deux cas peuvent se présenter. Les éléments-limites peuvent faire entre eux les mêmes angles que les éléments de symétrie proprement dits d'un polyèdre, le groupement ne comprendra qu'un nombre limité de cristaux, et il pourra se faire que l'ensemble présente, dans sa forme extérieure, l'aspect d'un cristal unique ayant dans sa forme cristalline une symétrie plus élevée que celle inhérente à chacun des cristaux composants. Il y aura, par suite, contradiction entre la symétrie extérieure et la symétrie révélée par d'autres propriétés telles que les propriétés optiques,

et il en résultera en apparence des anomalies optiques. Si, au contraire, les éléments-limites ne font pas entre eux les mêmes angles que les éléments de symétrie d'un polyèdre, le groupement n'aura, comme éléments de symétrie, qu'une partie des éléments-limites de la particule complexe, tantôt les uns, tantôt les autres. Il pourra donc se produire plusieurs groupements.

Ce dernier résultat conduit à une explication du polymorphisme : si les particules fondamentales se groupent en particules complexes, c'est qu'elles possèdent des éléments-limites se transformant en éléments réels dans cette particule complexe. Il pourra donc, dans certains cas, se produire plusieurs sortes de particules complexes donnant naissance à plusieurs sortes de cristaux de symétries différentes, mais tels que les éléments de symétrie de l'un soient les éléments de symétrie des groupements de l'autre, et inversement.

Pasteur avait cru reconnaître la loi régissant les formes cristallines d'un corps polymorphe, en constatant que leurs réseaux différaient fort peu ; c'est là un fait exact, mais qui n'est pas spécial aux formes d'un même corps. Une étude approfondie des corps cristallisés les plus différents a permis à Mallard de constater que les réseaux diffèrent fort peu d'un réseau cubique, et on peut dire que dans les différentes formes cristallines, la symétrie totale est toujours celle d'un cube.

Il est clair que les représentations précédentes avec des particules fondamentales et des particules complexes rentrent dans le type général des théories, c'est-à-dire de systèmes d'images ayant pour objet de synthétiser les observations et de conduire parfois à la prévision de faits nouveaux. Comme toute théorie, ces représentations sont donc sujettes à discussions ; celles-ci n'ont pas manqué et se continuent, car on n'apportera jamais une interprétation définitive dans des questions touchant à la physique moléculaire, ce qu'est véritablement la cristallographie. Ainsi, il n'y a pas une opinion unanime sur l'individualité de cette particule complexe, qui paraît jouer en cristallographie le même rôle que la molécule en chimie. On doit cependant reconnaître une grande valeur aux raisons données par M. Wyrouboff et par M. Wallerant en faveur de l'individualité, au moins relative, de la particule complexe, une des plus fortes étant fournie par l'étude des cristaux mous, comme ceux d'oléate d'ammoniaque, ou encore par les cristaux liquides. Sur bien des points il va falloir modifier les raisonnements un peu simplistes de la minéralogie classique ; les lois d'Hauy et de Bravais n ont rien d'absolu. On doit tenir compte des conditions de cristallisation ; en modifiant celles-ci, on peut arriver à produire de nouvelles faces, et l'étude des faces courbes devra quelque jour occuper les minéralogistes.

Je viens de faire allusion aux cristaux mous et

aux cristaux liquides ; leur découverte est certainement, dans le domaine de la cristallographie, le fait le plus marquant de ces dernières années : leur étude permettra de préciser les conditions auxquelles doit satisfaire la structure d'un corps pour posséder les propriétés d'un édifice cristallin. En particulier, les cristaux liquides nous amènent à nous demander si la répartition réticulaire des éléments constituants est nécessaire pour entraîner l'ensemble des propriétés physiques constatées dans les cristaux. Je dois ajouter qu'il y a là encore de nombreux sujets de discussion. Les liquides anisotropes sont troubles ; on a pu penser qu'ils ne sont pas homogènes et qu'il s'agit d'une émulsion, ou bien encore admettre l'existence de corps solides anisotropes en suspension.

Ces problèmes de mécanique moléculaire dans les milieux symétriques sont de la plus haute importance ; on y voit en quelque sorte la matière chercher à prendre des formes stables, variables d'ailleurs avec les conditions physiques, et les physico-chimistes ont cherché à rattacher leurs explications théoriques au principe de la moindre action. Ces recherches ont été inaugurées par Pasteur, et les mémoires de M. Gernez sur les cristallisations provoquées dans les liqueurs sursaturées, sont depuis longtemps devenus classiques ; ces études sont cultivées aujourd'hui surtout en Allemagne.

On est assez porté actuellement à regarder un

cristal comme une sorte d'être vivant, susceptible d'accroissement, et réparant ses pertes quand il a été blessé; les mots mêmes provoquent ici la comparaison. Il y a là un rapprochement artificiel, et il ne paraît pas légitime de comparer la formation cristallographique, qui marche uniformément dans le même sens, avec l'assimilation et la désassimilation périodiques qui sont la caractéristique des phénomènes vitaux; le cristal absorbe et n'excrète pas.

D'une manière plus générale, on parle assez couramment aujourd'hui de la *vie de la matière*, en entendant par là les transformations souvent très lentes qui se produisent dans des milieux qui paraissent en équilibre. C'est ainsi qu'un thermomètre dont le zéro se déplace devient un être vivant, ou encore le morceau d'étain gris de la page 204, atteint d'une sorte de maladie contagieuse, bien connue des constructeurs d'orgues, transmissible aux morceaux d'étain voisins, maladie que la chaleur peut heureusement guérir. On imagine aussi une mémoire de la matière qui se souvient de ses états antérieurs et s'arrange en conséquence. Au lieu de vie et de mémoire, il vaudrait mieux simplement parler d'hérédité, au sens où nous l'avons entendu dans un chapitre précédent; il est impossible dans ces phénomènes de conserver l'hypothèse de non-hérédité qui, nous l'avons dit, est à la base de la mécanique classique. Je me suis déjà expliqué (chap. III, sect. III) sur cette mécanique avec hérédité, où se présente-

ront, semble-t-il, les équations fonctionnelles plus compliquées que les équations différentielles auxquelles nous sommes habitués. Elles renfermeront, ai-je dit plus haut, des intégrales qui seront le témoignage d'une sorte d'hérédité. Le même mot *intégrale* vient aussi sous la plume des biologistes, quand ils parlent de l'hérédité. « Elle est, dit M. Giard[1], une intégrale : c'est la somme des variations produites sur chaque génération antérieure par les facteurs primaires de l'évolution ». Dans les rapprochements signalés, un mécanicien ne doit voir rien de plus que *cette hérédité*; il est amusant sans doute, mais bien inutile, de parler là de *vie* et de *mémoire*. N'ayons pas l'air d'expliquer *obscurum per obscurius*.

Nous venons d'envisager succinctement une partie de la minéralogie qui, sous le nom de cristallographie, est véritablement la physique moléculaire des milieux symétriques. Nous n'avons pas à nous arrêter à cette subdivision de la minéralogie qu'on appelle la minéralogie descriptive, mais il est une partie de la minéralogie nommée *pétrographie*, qui comprend l'étude des phénomènes volcaniques anciens et modernes, et qui est de grande importance. Lorsque Sorby eut l'heureuse idée d'appliquer l'examen microscopique à l'étude des roches, on constata tant de faits insoupçonnés que, dans l'enthousiasme des premières recherches, on put espérer résoudre

1. A. Giard. *Le principe de Lamarck et l'hérédité des modifications somatiques. Controverses transformistes*, page 135.

tous les problèmes que soulevait la genèse des roches éruptives. On fit passer sous le microscope les roches les plus diverses, et l'on put ainsi constater qu'elles se ramenaient à un petit nombre de types réunis par tous les intermédiaires. Il semble d'abord étonnant que l'on puisse regarder au microscope à travers un granit ou un basalte, mais on taille des lames dont l'épaisseur est d'environ deux centièmes de millimètre, et c'est un curieux spectacle que celui de la marquetterie présentée par ces plaques minces; il est hautement instructif pour le pétrographe, qui fait ainsi l'analyse des éléments composant la roche. On aperçoit parfois sous le microscope des inclusions, liquides ou gazeuses, qui peuvent renseigner sur les conditions dans lesquelles s'est opérée la solidification. Les travaux de MM. Fouqué et Michel Lévy sur ces sujets sont devenus classiques.

Les études précédentes ne suffisent pas cependant pour opérer une classification naturelle. En réalité, la genèse des roches ne peut être complément élucidée que par leur reproduction synthétique, le microscope intervenant pour identifier les produits artificiels avec les produits naturels. Un grand pas a été fait dans cette voie par MM. Fouqué et Michel Lévy qui ont obtenu, dans leur laboratoire, des roches microlithiques basiques, identiques aux roches naturelles, comme l'anorthite, le péridot, l'oligoclase et bien d'autres; ces remarquables expériences ont montré l'importance du rôle de la

fusion ignée dans la cristallisation des roches, fusion suivie d'un lent refroidissement. Jusqu'ici les roches acides à quartz, mica, etc., comme le granit, ont été réfractaires à toute reproduction. Ce n'est pas que la synthèse simultanée du quartz et de l'orthose n'ait pas été faite; elle a été réalisée, en 1879, par Friedel en faisant intervenir des carbonates alcalins comme minéralisateurs, et antérieurement on avait pu obtenir des cristaux de quartz en faisant agir sur les silicates la vapeur d'eau comprimée. Dans ses belles études sur les phénomènes volcaniques de la Martinique, M. Lacroix a constaté la formation du quartz sous l'action de la vapeur d'eau comprimée, ce qui est bien en accord avec les expériences précédentes.

## II

### LA GÉOLOGIE

Depuis vingt ans, les études géologiques se sont aussi profondément modifiées. Rebutés par l'insuccès des tentatives de synthèse de Léopold de Buch et d'Elie de Beaumont, les géologues s'étaient volontairement contraints à rester dans le domaine de l'observation pure, rejetant systématiquement toute conception théorique. Ils perdaient ainsi de vue le but que se propose la géologie, c'est-à-dire la reconstitution de l'histoire de notre globe. Les recherches, faites sans but précis, les amenaient à constater

de nombreux faits qui restaient isolés, sans liens et, il faut le dire, sans grand intérêt. Ce n'est pas qu'aujourd'hui on ait renoncé à l'observation ; elle est, au contraire, d'autant plus active que les progrès de la civilisation la rendent plus facile. La construction des chemins de fer, le creusement des tunnels, la recherche des substances utiles à l'industrie permettent de résoudre bien des problèmes d'importance locale. D'autre part, les explorateurs en pénétrant dans les régions inconnues, ont ouvert un nouveau champ aux recherches géologiques. Grâce aux voyageurs anglais et russes, on possédera bientôt des données précises sur l'Asie centrale. De leurs côtés, les services géologiques des États-Unis et du Canada défrichent, tous les ans, une partie de leurs immenses territoires ; la recherche de l'or et du diamant en Afrique et en Australie, a eu aussi pour résultat de faire connaître, tout au moins dans leurs grands traits, la constitution de ces continents. Enfin, l'épopée de M. Nansen à travers les régions polaires, en faisant connaître, entre bien d'autres résultats, l'existence d'une mer profonde dans les régions arctiques boréales, apporte une contribution importante à la géologie.

Mais tous ces résultats isolés ne présentent qu'un intérêt restreint, et il eût même été à craindre que leur accumulation ne rendît inabordable l'étude de la géologie. Il était indispensable de les relier, de

les coordonner, d'en faire sortir des vues d'ensemble sur l'histoire de la terre. Ce fut, depuis quinze ou vingt ans, l'œuvre de M. Suess et de ses adeptes. Il convient, toutefois de ne pas être injuste envers les systèmes précédents; les théories nouvelles, nous le savons, sont toujours faites des débris des théories qui les ont précédées, et nous ne devons pas oublier que Léopold de Buch et Élie de Beaumont ont été de grands précurseurs.

On doit à M. Suess un ouvrage magistral, l'*Antlitz der Erde*, qui est aujourd'hui le livre de chevet de tous les stratigraphes. « Avant tout, dit M. Marcel Bertrand, dans la préface de la traduction française de ce volume, M. Suess cherche à établir que les montagnes ne résultent ni de soulèvements opérés de bas en haut, ni de compressions latérales produites par les roches éruptives; ces dernières n'ont joué partout que le rôle d'éléments passifs. C'est l'abandon du système de Léopold de Buch. Par contre, le dernier chapitre montre, comme conclusion d'ensemble, qu'il n'y a trace, à la surface du globe, d'aucun arrangement géométrique; le dessin des chaînes, comme celui des contours océaniques, présente des irrégularités dont l'origine ne doit être rattachée qu'à quelque dissymétrie primitive et accidentelle, peut-être, par exemple, à la forme et à la distribution des premiers îlots de scories qui se sont épaissis à la surface de notre planète; c'est-à-dire qu'il faut renoncer à la recherche de lois factices et

illusoires. C'est le système d'Élie de Beaumont qui, à son tour est condamné. »

M. Suess a été le premier à distinguer les différents types de dislocation et à les répartir en deux catégories, d'après la nature des forces qui leur avaient donné naissance. Quand une partie de l'écorce terrestre manque d'appuis, par suite de la contraction de la masse centrale, elle se trouve soumise à une force verticale, la pesanteur, et à des réactions tangentielles : d'où deux catégories de dislocations. Sous l'influence des forces verticales, il se produit des cassures verticales accompagnées de dénivellations, autrement dit des failles. Celles-ci sont rarement isolées, elles se rencontrent en grand nombre dans une même région et dessinent grossièrement des polygones concentriques à cette région. Dans toutes, la dénivellation se produit du côté du centre de la région, qui est, par suite, le point le plus affaissé. Une telle région a reçu le nom de bassin d'affaissement. Quand deux bassins sont dans le voisinage l'un de l'autre, ils sont séparés par une région non affaissée qui a reçu le nom de *horst*. Ainsi le bassin de Paris est séparé par les Vosges de la vallée du Rhin qui est aussi un bassin d'affaissement. Il y a lieu de remarquer que, grâce à ces failles, il y a extension des couches. Au contraire, sous l'influence des forces tangentielles, il y a compression : les couches se plissent et, si la poussée tangentielle est suffisante, il se produit des

fractures sensiblement horizontales permettant le chevauchement des couches superficielles sur les couches profondes.

Ces plis ne sont d'ailleurs pas non plus isolés ; ils affectent des zones très allongées relativement à leur largeur. Dans ces zones, dites *zones de plissement*, certains groupes de plis parallèles sont surélevés et forment ce que nous appelons des chaînes de montagnes, et l'on a généralement le tort de considérer comme indépendantes les chaînes d'une même zone, quoiqu'elles aient même origine. Dans une zone, les plis peuvent ne pas être rectilignes : par suite de l'existence d'obstacles préexistants, ils ont pu s'infléchir ; mais, dans ce cas, le changement de direction se fait toujours d'une manière continue, contrairement aux idées émises par Élie de Beaumont. Ce principe de continuité, établi par M. Suess, lui a permis de suivre une même chaîne à travers l'Europe et l'Asie, de montrer que des montagnes considérées jusqu'alors comme indépendantes n'étaient que des fragments d'une même chaîne : il a ainsi établi les liens existant entre les Pyrénées, les monts de Provence, les Alpes, les Carpathes, les Balkans, le Caucase, le Pamir, l'Himalaya. Cette chaîne n'est d'ailleurs que la limite nord d'une zone de plissement limitée au sud par d'autres chaînes, telles que l'arc constitué par la chaîne Bétique au sud de l'Espagne, qui se continue par l'Atlas, la Sicile et l'Apennin. Au milieu de cette zone s'est

produit un bassin d'affaissement constituant aujourd'hui la Méditerranée occidentale. Outre cette première zone, M. Suess a pu reconstituer deux autres zones de plissement plus anciennes, l'une s'étendant du sud de l'Irlande à la Bohême et au Thian-Chan, l'autre allant de l'Écosse à la Scandinavie.

Aux trois chaînes de M. Suess, M. Marcel Bertrand en ajoute deux autres plus anciennes et plus septentrionales. Montrant les relations d'âges existant entre ces chaînes et les phases éruptives, il fait disparaître l'antagonisme entre l'école allemande et l'école française, au sujet de la relation entre les caractères et l'âge des roches. M. Suess avait donné le coup de grâce au système pentagonal d'Élie de Beaumont. M. Bertrand lui substitue le système orthogonal en montrant que les zones de dislocation sont sensiblement parallèles soit à l'équateur, soit aux méridiens ; il met aussi en évidence le rôle capital joué par les nappes de charriage dans la surrection de toutes les chaînes, et, combinant cette notion avec celle du tétraèdre de Green, il tente de reconstituer toute la genèse de la déformation de notre globe terrestre.

A côté des mouvements de l'écorce solide, M. Suess considère à part ceux de l'enveloppe liquide ; il signale l'importance des développements des rivages des mers à un moment donné et montre que périodiquement se sont produites de grandes transgressions marines, dont on retrouve des traces

sur presque toute la surface de la terre. Les tentatives de reconstitution des anciennes mers peuvent d'ailleurs maintenant s'appuyer sur des données plus précises, grâce aux explorations géologiques dans des contrées restées jusqu'alors inconnues à ce point de vue ; c'est un travail auquel divers géologues, et en particulier M. de Lapparent, se sont livrés avec le plus grand succès, et on peut voir dans la dernière édition de son magistral traité de géologie, une esquisse de la terre et des mers à chaque période géologique. Le progrès a été surtout sensible dans les pays voisins de la zone arctique ; il s'y est fait des découvertes inattendues, notamment en ce qui concerne l'extension septentrionale des diverses mers jurassiques. On connaît aujourd'hui, au moins dans ses grands traits, la géographie physique de la terre pour chaque période de son évolution. Alliée à la géologie, la géographie est ainsi complètement transformée ; la nouvelle école géographique s'est donné pour tâche d'expliquer la genèse de toutes les formes terrestres, en insistant particulièrement sur la notion des cycles d'érosion, et la question d'âge a pris pour les formes topographiques une importance capitale.

J'ai fait allusion tout à l'heure à la notion du tétraèdre de Lowthian Green, c'est-à-dire à une théorie tétraédrique de la figure de la Terre, assez en faveur aujourd'hui, qui cherche à expliquer la distribution actuelle des continents et des mers. L'écorce terrestre en se refroidissant aurait tendu à

prendre la forme d'un tétraèdre, dont un sommet serait approximativement au pôle sud, et les trois autres dans les massifs continentaux de l'Europe-Afrique, de l'Asie-Océanie et de l'Amérique, massifs qui se terminent en pointe vers le sud, et répondent sensiblement aux arêtes du tétraèdre. Entre les trois massifs continentaux s'étendent trois nappes océaniques, répondant à trois des faces planes du tétraèdre, et qui sont l'Atlantique, l'Océan Indien et l'Océan Pacifique. La face nord du tétraèdre correspondrait aux mers profondes des régions arctiques septentrionales, dont le voyage de Nansen a d'ailleurs démontré l'existence. Le pôle sud de la terre serait au contraire une saillie, ce qui est d'accord avec l'existence des terres émergées dont l'existence ne semble guère douteuse depuis les voyages du milieu du siècle dernier. Bien entendu, l'assimilation de la surface terrestre à un tétraèdre est d'une géométrie approximative, les parties trop saillantes ayant été usées. Cette théorie rend compte de beaucoup d'autres faits. Par suite de la rotation diurne, il y a eu une torsion du tétraèdre qui explique la déviation vers l'est des prolongements de l'hémisphère sud par rapport aux masses continentales de l'hémisphère nord ; de plus, cette torsion a amené une sorte de dislocation qui donne la raison de la grande dépression intercontinentale, formée par la Méditerranée, la mer des Antilles et les mers de l'archipel Polynésien. Enfin on peut rattacher à la théorie de Green

la répartition des volcans ; ils se trouvent dans les régions de moindre résistance environnant les arètes du tétraèdre et la dépression intercontinentale.

La surface de la terre est dans un perpétuel état de tassement et de déformation, dû à la contraction du globe terrestre. Le sol, qui paraît si fixe sous nos pieds, est en réalité dans une agitation presque constante : c'est ce qu'a montré la *sismologie*, ou étude systématique des tremblements de terre. Cette branche un peu spéciale de la géologie a réalisé dans ces derniers temps des progrès considérables, et des faits extrêmement curieux ont été mis en évidence par l'observation des sismographes c'est-à-dire de pendules, mobiles autour d'axes horizontaux ou verticaux, convenablement disposés. De l'ensemble des observations il résulte que, quand un point est ébranlé, on peut se représenter de la manière suivante la propagation de l'ébranlement. La transmission des ondes sismiques se communique au point antipode par l'intérieur du globe terrestre, et par la surface terrestre. L'onde centrale se compose en réalité de deux ondes simples arrivant respectivement aux antipodes à peu près vingt et quarante minutes après l'ébranlement, tandis que l'onde superficielle met environ une heure.

Il y a d'ailleurs sur la surface terrestre des régions favorisées au point de vue sismique. C'est un résultat important que ces régions favorisées se trouvent dans les parties de l'écorce terrestre où la pente

moyenne des accidents du relief est considérable. Elles sont en général situées dans l'océan, non loin des rivages que dominent les hautes chaînes de montagnes et au-dessus d'abîmes sous-marins, où la sonde accuse de très grandes profondeurs ; c'est ce qui arrive pour le Japon et pour le littoral américain entre le Pérou et le Chili.

# CHAPITRE VII

## Physiologie et Chimie biologique.

I. La Physiologie. — II. La matière vivante et les théories physico-chimiques. — III. La Chimie biologique.

---

### I

### LA PHYSIOLOGIE

Nous arrivons enfin aux sciences de la vie. Nous avons déjà eu de grandes difficultés à donner une idée des divers points de vue auxquels on peut se placer quand on parle d'*explication* dans les sciences physico-chimiques. On peut penser combien les questions analogues deviennent plus difficiles, quand il s'agit des sciences biologiques. Aussi, dans ces sciences, entend-on actuellement le mot *explication* de deux manières différentes ; ce sera d'abord le mot pris au sens où cherchent à l'entendre les mécaniciens et les physiciens, et, en second lieu, surtout dans certains chapitres de la zoologie, on regardera

parfois une *narration historique* comme une explication se bornant, faute de mieux, à raconter une évolution dont on ne peut préciser les causes.

En quoi consiste la vie? Les phénomènes vitaux diffèrent-ils essentiellement des phénomènes que nous observons dans la nature inanimée? Il n'est plus de biologistes restés attachés aux doctrines des anciennes écoles vitalistes, du moins sous leurs premières formes, mais il en est encore qui pensent, comme Claude Bernard, que la matière n'engendre pas les phénomènes qu'elle manifeste, et ils admettent, avec le grand physiologiste, un principe d'ordre, une idée directrice; ce qui ne les empêche pas d'ailleurs de poser en principe le déterminisme physiologique des phénomènes que l'on étudie, déterminisme sans lequel il n'est pas de science. Ces physiologistes ne cherchent pas à entrer, si je puis dire, dans la *théorie* des phénomènes vitaux; je serais tenté de les rapprocher des partisans de l'énergétique purement expérimentale, dont je parlais dans un précédent chapitre. Une comparaison éclaircira ce rapprochement. De nombreux physiciens, avons-nous dit, ne se préoccupent pas de savoir si la chaleur est ou non un mode de mouvement; ils n'en appliquent pas moins les lois générales de la thermodynamique qui sont indépendantes d'hypothèses spéciales sur la nature de la chaleur. Pareillement, ils ne se posent aucune question sur ce que c'est que l'électricité; ils n'en bâtissent pas moins, avec Helmholtz

et Gibbs, une théorie de la pile, et de ce que l'énergie mécanique est transformable en énergie électrique ils ne cherchent pas à conclure une explication mécanique de l'électricité. On peut apporter les mêmes tendances d'esprit dans l'étude des phénomènes vitaux. A ce point de vue, les questions de doctrine ne se posent pas. Pour certains, il peut être indifférent qu'il y ait ou non dans les phénomènes vitaux une forme spéciale de l'énergie; si une telle forme existe, elle viendra se placer à côté des autres formes d'énergie déjà considérées.

Des travaux de la plus haute importance ont été faits dans cet ordre d'idées, que leurs auteurs se rattachent d'ailleurs à une doctrine philosophique ou à une autre. Le point essentiel est ici d'établir des relations d'équivalence entre différentes formes d'énergie. Parmi elles, se trouvent ces sortes d'énergie que quelques-uns appellent encore vitales et qui correspondent au travail que M. Chauveau appelle physiologique. Elles sont relatives aux phénomènes qui s'accomplissent dans les tissus en activité, et qu'on ne peut pas encore ramener d'une manière nette aux types connus des phénomènes physiques, chimiques et mécaniques; elles correspondent, par exemple, à ce qui se passe dans le nerf qui conduit l'influx nerveux, ou dans le muscle qui va se raccourcir. Ainsi, il ne semble pas qu'on puisse admettre qu'un muscle fonctionne comme

une machine thermique, et on en a conclu que les faits connus relatifs à la contraction musculaire sont compatibles avec l'idée de la transformation directe de l'énergie chimique en une forme spéciale d'énergie physiologique ; d'ailleurs, dans tous ces phénomènes, on retrouve en quelque sorte, comme forme de déchet, l'énergie calorifique, cette forme dégradée de l'énergie, qui se dissipe ou joue le rôle d'amorçant dans les réactions chimiques. Des points restés très obscurs ont été éclairés par cet énergétique biologique. Il suffira de rappeler les beaux travaux de M. Chauveau sur l'énergie dépensée par le travail intérieur des muscles dans leurs différents modes de contraction, et sa classification de la valeur énergétique des aliments, en les classant en bio-thermogènes et simplement thermogènes.

Il n'est pas sans difficultés de supposer que muscle, glande, nerf aient chacun une énergie conforme à leur fonction. Aussi les idées sur ces formes spécifiques d'énergie sont-elles peu à peu abandonnées, les uns ne se souciant que de relations d'équivalence et retenant seulement, s'ils sont restés attachés à la pensée citée plus haut de Claude Bernard, l'idée d'une direction dans les mutations d'énergie, les autres, c'est-à-dire la grande majorité des biologistes actuels, poussant jusqu'au bout la thèse physico-chimique.

Une des parties les plus importantes de la physiologie est la physiologie des nerfs. En se bornant

seulement aux dernières années, on remplirait une bibliothèque avec les travaux relatifs au système nerveux, mais il faut avouer que l'impression est assez confuse qui se dégage de la conclusion des mémoires les plus importants. C'est en tant qu'instrument de la solidarité des parties de l'organisme que le système nerveux intéresse surtout la physiologie ; il constitue entre ces diverses parties un immense réseau de communications. Les comparaisons abondent pour donner une idée du rôle du système nerveux ; on les emprunte souvent maintenant à la téléphonie, la station obligatoire dans un centre nerveux encéphalo-rachidien correspondant au poste central. On s'est naturellement demandé quel est le processus intime de l'excitation. Il est généralement admis que le stimulus nerveux joue le rôle d'amorce ; il y a un déclanchement, et par exemple, le rapport de l'énergie excitante à l'énergie fournie par le muscle est extrêmement petit.

Si, après l'excitation, nous arrivons à la conduction, bien des problèmes se posent, sujets à discussion, sur la nature de l'influx nerveux. L'assimilation avec un courant électrique se présentait naturellement, mais cette hypothèse est abandonnée aujourd'hui ; la question de la possibilité de la propagation dans les deux sens n'est même pas résolue par tous de façon identique. La vitesse de conduction de l'influx nerveux a pu être mesurée dans beaucoup de cas ; elle est très lente, variant de soixante-dix mètres à

huit mètres par seconde. Quelle est la nature de cette *onde nerveuse* ? Beaucoup admettent qu'elle est de nature électrolytique, c'est-à-dire que le courant nerveux n'est au fond qu'un déplacement d'ions continué de proche en proche. Le nerf est ainsi assimilé à un électrolyte de constitution non uniforme, le transfert d'énergie se faisant de l'endroit où la concentration est plus forte à celle où elle est plus faible ; M. Lehmann a réalisé ainsi des sortes de nerfs artificiels avec des chaînes de piles. Ce qui nous intéresse dans de telles interprétations, c'est la tendance générale à ramener les phénomènes vitaux aux phénomènes physiques et chimiques ; les noms de bio-physique et de bio-chimie doivent même, pour quelques-uns, remplacer celui de physiologie. Nous reviendrons sur cette orientation capitale pour les recherches modernes à propos des théories physico-chimiques de la vie.

L'anatomie et l'histologie du système nerveux ont fait beaucoup plus de progrès que la physiologie de ce système ; de nombreuses et patientes recherches y ont considérablement accru nos connaissances dans ce domaine. Un premier pas important avait été fait, quand on avait constaté que la fibre nerveuse, ou du moins la partie essentielle de la fibre, celle qui en occupe l'axe, le cylindre-axe n'est qu'un prolongement, qui peut atteindre des dimensions considérables, de la cellule nerveuse. Celle-ci devient donc l'élément essentiel ; outre son cylindre-axe, la

cellule nerveuse présente des ramifications très nombreuses. Quel est le mode de communication des cellules entre elles ? Pour les uns, les cellules nerveuses confondent en un réseau, soit leurs prolongements protoplasmiques, soit leurs ramifications cylindro-axiles ; d'autres nient l'existence d'un réseau et s'attachent à établir la doctrine des *neurones*, c'est-à-dire des cellules nerveuses individualisées, dont les prolongements entrent seulement en contact par leurs extrémités : entre les deux opinions le procès est toujours pendant. Remarquons que, dans les recherches de ce genre, la technique joue un rôle essentiel, certains réactifs permettant de voir des éléments qui jusque-là n'ont pu être mis en évidence. L'emploi des procédés, comme celui de Golgi au chromate d'argent et celui de Ehrlich au bleu de méthylène, ont été l'origine de découvertes capitales. Une autre question de haute importance, encore controversée, est celle de la non-régénération des cellules nerveuses détruites. Il est cependant très probable que le tissu nerveux est un tissu à éléments perpétuels, incapable de multiplication et de régénération ; ainsi le tissu noble par excellence ne pourrait pas se reformer, résultat de grande conséquence pour le mécanisme de la sénilité.

Dans ce vaste domaine de la physiologie, je ne peux que jeter quelques coups d'œil sur ma route, je signalerai seulement l'invasion des instruments de physique et de mécanique dans les laboratoires

de physiologie ; il existe aujourd'hui une physique des nerfs, des muscles et des organes des sens, une mécanique du squelette, de la circulation et de la respiration due surtout aux travaux si élégants et si précis de M. Marey.

## II

### LA MATIÈRE VIVANTE ET LES THÉORIES PHYSICO-CHIMIQUES

Les travaux précédents sont surtout relatifs à un organe pris dans son ensemble chez un animal, et concernent donc la vie d'ensemble des cellules qui le composent, ce qui a été le premier objet de la physiologie classique. Une autre tendance dans les recherches s'est manifestée depuis longtemps déjà en physiologie. On a cherché à créer une physiologie cellulaire, en étudiant les propriétés physiologiques de la cellule. Ce sont les propriétés mêmes de la vie pour les êtres unicellulaires ; chez les êtres pluricellulaires, aux propriétés élémentaires des cellules qui les composent, devront s'ajouter les actions des cellules les unes sur les autres, car un être vivant est autre chose qu'une juxtaposition de cellules. D'après Claude Bernard, le caractère le plus général auquel se reconnaît un être vivant est l'échange qu'il entretient avec son milieu. En fait, tous les caractères de la matière vivante, son équilibre mobile, son organisation chimique et anato-

mique sont regardées aujourd'hui par la grande majorité des biologistes comme des propriétés secondaires par rapport à la *nutrition*, qui est l'attribut essentiel de la vie. La nature des échanges entre l'être vivant et son milieu, c'est-à-dire la physiologie de la nutrition a fait l'objet de travaux considérables, dont on trouvera une très intéressante étude critique dans le livre de Dastre sur *la Vie et la Mort*. On y verra combien le sujet prête encore à la discussion. Les physiologistes notamment ne sont pas unanimes sur la question du renouvellement de la substance réellement vivante; on tend aujourd'hui cependant à admettre que, dans un organe à l'état adulte, le protoplasma vital se détruit peu, comme le formulait dès 1881 M. Armand Gautier; M. Chauveau a comparé l'usure d'une cellule vivante, au moins dans les muscles, à celle des organes d'une machine à vapeur qui s'altèrent seulement avec une grande lenteur. La plus grande partie des aliments, après son élaboration par la matière vivante, forme les réserves, comme le glycogène, les graisses, etc...

On pourrait parler ici des fermentations, en rappelant que Claude Bernard voyait dans la vie une fermentation. Elles jouent dans le mécanisme vital, le premier rôle, et c'est une idée aujourd'hui courante que la vie est sous la dépendance d'un ensemble de fermentations se produisant dans les cellules et les plasmas de l'être vivant. On commence à

pénétrer un peu dans le détail de certains actes fermentatifs ; nous en dirons un mot en chimie biologique.

J'ai dit plus haut que, pour la majorité des biologistes, les phénomènes vitaux se ramènent aux phénomènes physico-chimiques. Les doctrines vitalistes, même considérablement atténuées, deviennent, en effet, de moins en moins fécondes, et c'est un embarras, semble-t-il, que de maintenir une *idée directrice*, qui ne peut entrer dans aucune équation et ne peut par suite servir pour aucune prévision. Mais il ne faut pas croire que les choses soient devenues très claires et très faciles, parce qu'on se place au point de vue physico-chimique. On a dû peu à peu reconnaître que ce sont les parties de la physico-chimie les moins élaborées qui sont appelées à fournir en biologie les explications les plus importantes. Certaines conquêtes sont éclatantes, tel, par exemple le rôle de l'osmose dans les phénomènes physiologiques, notamment dans la croissance des plantes, ou encore dans la fonction des globules rouges du sang trouvée en relation étroite avec la pression osmotique du liquide qui les baigne. Mais, quand on veut pénétrer dans la mécanique de la cellule, on se trouve en présence des éléments du protoplasma, c'est-à-dire de corps de la nature des *colloïdes* dont l'étude, quoique commencée depuis longtemps par Graham, n'a été reprise que récemment, en profitant des ressources de la technique moderne.

La biologie a été vraiment une excitatrice pour la physico-chimie ;sans reparler de l'énergétique qui fut d'abord biologique avec Robert Mayer, nous avons vu la théorie des *solutions vraies* se développer à la suite des observations de Pfeffer, et maintenant les physico-chimistes sont incités par des problèmes physiologiques à des recherches sur les *solutions colloïdales*. Il semble que de véritables *théories de la vie* ne pourront être édifiées, si toutefois on peut y parvenir, tant que l'étude des colloïdes n'aura pas fait de nouveaux progrès; il y a d'ailleurs lieu d'espérer que, quoi qu'il advienne, la biologie tirera grand parti de ces progrès. Les colloïdes attirent d'autant plus l'attention qu'ils semblent une image de la matière vivante ; ils sont comme elle, en une évolution perpétuelle qui ne tend pas à les fixer dans un état stable. On peut regarder comme bien probable que l'électrisation de contact joue un rôle important dans les mouvements des colloïdes; c'est là du moins une opinion émise par divers auteurs et discutée par M. Jean Perrin dans son récent mémoire sur l'osmose électrique. En particulier, certaines divisions observées dans le développement de la cellule et dont nous aurons à parler dans le chapitre suivant, trouveront peut-être une explication, au moins partielle, dans l'électrisation à la surface de contact des granules protoplasmiques avec le milieu aqueux; les tensions superficielles varient avec l'acidité de ce milieu, et

l'accroissement de surface tend à la dislocation des granules. Il est légitime de compter, pour donner à ces vues une base expérimentale, sur la vision ultra-microscopique, dont nous avons parlé plus haut; grâce à elle, on a pu apercevoir des granules dans les solutions colloïdales.

Quand bien même l'avenir montrerait qu'il faut en rabattre des espérances suscitées par des comparaisons peut-être trop hâtives, le désir d'explications physiques des phénomènes vitaux n'en aura pas moins provoqué un mouvement expérimental très important dans des parties restées jusqu'ici fort troubles de la physico-chimie. Sur des sujets d'une telle complication, il faut d'ailleurs apporter beaucoup de prudence, et se méfier de ces chercheurs trop simplistes, qui s'exclament devant une émulsion où apparaissent des sortes de cellules, croyant avoir fait une synthèse de la matière vivante. C'est ainsi que les mouvements spontanés offerts par ces émulsions et dus à des changements locaux de la tension superficielle présentent un tout autre mécanisme que celui des amibes, auquel on avait été tenté de les comparer. Nous pourrions redire encore ce que nous avons dit en général des théories. Ici plus qu'ailleurs, il pourrait être question *d'images*, et il ne faut pas être dupes des schèmes trop simplifiés par lesquels on voudrait représenter l'être vivant; s'ils rendent pendant un temps des services à la science, ils peuvent ensuite retarder ses progrès. La chaîne des approximations sera longue en des matières aussi ardues.

## III

### LA CHIMIE BIOLOGIQUE

La chimie biologique est devenue de nos jours une science spéciale, ayant ses chaires et ses laboratoires : elle a pour objet l'étude des phénomènes chimiques de la vie. Dans la chimie des être vivants, les méthodes ne peuvent être autres que dans la chimie des corps minéraux et des corps organiques, mais les problèmes sont encore plus délicats. Une question intéressante est celle de la connaissance de la composition immédiate des animaux et des plantes. De nombreux principes immédiats ont été découverts et ont mis en évidence d'importantes relations; on s'efforce de suivre leur synthèse et leur destruction dans les organismes. Comment avec de l'eau, de l'acide carbonique et des sels minéraux, la plante, par exemple, peut-elle former des combinaisons complexes, comme les hydrates de carbone, les sucres, l'amidon, l'albumine? Il s'en faut qu'on puisse encore répondre à toutes ces questions, mais cependant des résultats considérables ont été obtenus, modifiant en bien des points les idées reçues; en particulier, la formation des hydrates de carbone dans l'action chlorophyllienne serait beaucoup plus complexe qu'on ne l'avait cru, de l'aldéhyde méthylique se formant et donnant par polymérisation les

hydrates de carbone. Il est inutile d'insister sur l'intérêt qu'il y a à suivre les évolutions de la matière dans les corps vivants et à étudier en même temps les énergies mises en œuvre dans ces tranformations. Avec ces problèmes, nous nous trouvons dans le grand courant d'idées qui a été si fécond en physique et en chimie, et l'on comprend alors que l'on puisse parler de biochimie.

Avec Pasteur et ses premiers disciples, la chimie biologique s'occupait surtout des fermentations. Leur importance dans le mécanisme vital apparaît de plus en plus grande, mais les points de vue se sont élargis. Tout d'abord, on constata que la fermentation n'est pas l'attribut exclusif de certains êtres organisés, et que toute cellule est susceptible, dans des conditions convenables, de produire des fermentations; c'est ainsi, comme l'a autrefois observé Lechartier, que des fruits mûrs mis à l'abri de l'air, dans une atmosphère d'acide carbonique, donnent de l'alcool aux dépens de leur sucre, et cette observation a été généralisée par M. Muntz. Les études sur les fermentations évoluèrent dans un sens proprement chimique, quand on eut découvert les ferments solubles, appelés *diastases* ou *enzymes*, qui sont les agents chimiques des phénomènes fermentatifs. Un des plus anciennement connus est l'invertine de M. Berthelot, qui transforme le sucre de canne en glucose et lévulose; c'est un ferment hydrolysant et dédoublant, et la fermentation alcoo-

lique du sucre de canne ne commence qu'après ce dédoublement. Les diastases sont très répandues dans les organismes tant animaux que végétaux. Elles sont élaborées par les cellules ; dans cet ordre d'idées, une découverte mémorable fut faite en 1897 par M. Büchner, celle de la diastase alcoolique. Celle-ci n'exsude pas d'elle-même de la cellule de levure de bière, et il n'a été possible de l'en extraire que par une très forte compression et au moyen d'une technique compliquée. Si dans la diastase ainsi obtenue, on met du sucre en poudre, on obtient de l'acide carbonique, et, en distillant, on trouve de l'alcool. La diastase alcoolique est susceptible de résister à une température de cent vingt degrés, fait exceptionnel, car les autres diastases perdent tout pouvoir à une température d'environ cent degrés.

Des ferments de même ordre, mais provoquant des oxydations, ont été découverts dans le suc de certaines plantes par M. G. Bertrand, qui a ainsi créé un nouveau chapitre de la physiologie cellulaire; il a mis en évidence une oxydase dans le latex de la laque de Chine, c'est-à-dire dans le suc laiteux de l'arbre à laque employé en Asie orientale pour le vernissage des meubles. Dans le latex, la laccase oxyde le laccol; elle peut oxyder d'autres phénols, en particulier l'hydroquinone. Diverses diastases oxydantes ont été depuis trouvées par MM. Bourquelot, Duclaux et d'autres chimistes.

La composition chimique des diastases est loin d'être connue, leur préparation à l'état pur et leur analyse étant pour ainsi dire impossibles. Quelques faits d'une extrême importance ont été cependant signalés. Dans la laccase, M. G. Bertrand a signalé le rôle prépondérant du manganèse, le pouvoir oxydant d'une laccase variant comme sa teneur en manganèse. A la suite de ces études, M. Bertrand a été conduit à penser qu'il y a, dans un grand nombre de substances diastasiques, sinon dans toutes, une première substance active qui suffit à la rigueur à produire l'action considérée (le manganèse dans le cas de la laccase) et une seconde qui augmente sa vitesse de réaction (dans le même cas, la substance organique de la laccase, altérable par la chaleur).

L'exemple précédent de l'importance d'un élément minéral n'est pas unique; chaque diastase possède sa minéralisation propre et, sa minéralisation perdue, la substance reste inactive. Ainsi, la lipase, ferment des matières grasses, perd ses propriétés si on lui enlève son minéral qui est le sodium.

Parmi les plantes, les champignons se montrent surtout riches en diastases diverses. Non seulement on a mis en évidence tel ou tel ferment dans les organes des plantes, mais M. Guignard est arrivé, pour certains d'entre eux, comme la myrosine et l'émulsine, à préciser à l'aide de réactions microchimiques, leur localisation dans des cellules spé-

ciales, ce qui a permis ensuite à divers observateurs de reconnaître le siège de la plupart des alcaloïdes retirés des plantes par des procédés chimiques.

Quels sont maintenant les modes d'action des diastases? On les a comparées aux actions catalytiques. Il y aurait ici bien des distinctions à faire. Certaines fermentations constituent des réactions irréversibles. Dans ce cas, comme M. Berthelot l'a remarqué depuis longtemps, les ferments ne fournissent pas d'énergie aux substances qu'ils transforment; ils jouent le rôle d'amorce pour les réactions irréversibles se produisant dans des éléments en équilibre peu stable. On peut comparer cette action à l'action décomposante énergique que possède le platine à l'état colloïdal sur l'eau oxygénée, comme l'a montré Bredig; ce platine serait, en quelque sorte, un ferment inorganique, dont, chose très curieuse, certains poisons, comme l'hydrogène sulfuré, paralysent l'action. Les actions sont illimitées, et l'agent de la transformation se trouve à la fin de la réaction dans les mêmes conditions qu'au début. Il y a aussi des fermentations avec un caractère réversible. Un premier exemple d'une telle diastase a été donné par Croft Hill avec la maltase, qui tantôt hydrolyse le maltose en le transformant en glycose, tantôt déshydrate celui-ci en le ramenant à l'état de maltose. Pour ces ferments solubles, l'action est entravée par les produits de la réaction; d'où des phénomènes réversibles d'équi-

libre. Il peut d'ailleurs se faire que le catalyseur se retrouve à la fin de la réaction sous sa forme primitive. Alors l'équilibre ne peut pas être modifié par la présence de ce catalyseur; c'est un point qui a été quelquefois nié, mais que les recherches de Gibbs et de Le Châtelier ne laissent pas douteux. Le catalyseur influe sur les vitesses des réactions contraires, dont l'égalité produit l'équilibre; dans ces derniers temps, l'étude de ces vitesses des réactions diastasiques a fait l'objet des travaux de Victor Henri.

On voit assez, par ce qui précède, l'immense domaine que la chimie des enzymes doit exploiter et dans lequel la chimie organique synthétique trouvera certainement une abondante moisson. Mais, nous ne pouvons insister; notre seul but ici était de montrer, par quelques exemples, les voies nouvelles où s'engage la chimie des êtres vivants, chimie tellement compliquée qu'on a pu croire longtemps qu'elle était différente de la chimie à laquelle on était habitué. Et je n'ai parlé que des *diastases*, mais voici qu'apparaissent les *antidiastases* s'opposant à l'œuvre des premières : telle l'antidiastase empêchant la présure de cailler le lait. Nous rejoignons ici les toxines et les antitoxines, dont il sera dit un mot dans le dernier chapitre de ce volume.

# CHAPITRE VIII

## Botanique et Zoologie.

I. La Botanique générale. — II. Les organismes inférieurs et les applications agronomiques. — III. La Zoologie et les idées d'évolution en biologie. — IV. Les doctrines transformistes. — V. La distribution des êtres vivants et la Paléontologie.

---

### I

### LA BOTANIQUE GÉNÉRALE

Les êtres vivants ont été partagés en végétaux et animaux : la classification s'offrait d'elle-même, mais la distinction est loin d'être aussi tranchée qu'elle l'a paru longtemps. Entre les végétaux et les animaux, il existe des termes de passage participant des propriétés des uns et des autres, de telle sorte qu'il y a comme un tronc commun à la base du règne végétal et du règne animal. En outre, l'attention des biologistes s'est particulièrement portée sur la cellule qui apparaît comme l'unité de matière vivante, unité provisoire sans aucun doute, car elle

est elle-même un élément extrêmement complexe, dont la complication apparaît de mieux en mieux, à mesure que l'on emploie des appareils plus parfaits d'observation et des réactifs plus précis d'analyse.

L'étude de la cellule végétale se trouvait en retard sur celle de la cellule animale, après l'avoir précédée. D'importants travaux sont venus, dans les quinze dernières années, combler cette lacune : ils sont relatifs aux communications protoplasmiques, aux centrosomes, au noyau, à la membrane cellulaire. Étendant ce que Thuret et M. Bornet avaient constaté jadis chez les floridées, on a pu reconnaître que, dans nombre de cas, les ponctuations des membranes cellulaires livrent passage à des fils protoplasmiques très ténus, établissant des communications directes entre les cellules; résultat important, en ce qu'il montre de nouveau que le corps de la plante n'est pas simplement un agrégat de cellules plus ou moins différenciées, mais bien un ensemble vivant.

Outre le protoplasma, la cellule renferme, en général, un noyau. A côté de ce noyau, des corps spéciaux avaient été observés d'abord dans les cellules animales, par MM. Strassburger, van Beneden et d'autres naturalistes, et désignés sous le nom de *centrosomes*, corps qui paraissent jouer le rôle de centre dynamique dans la cellule. M. Guignard en annonça, en 1891, l'existence chez les plantes. C'est

surtout chez les thallophytes que les centrosomes ont été le plus facilement observés, et on les a rencontrés aussi chez les algues et les fougères. Les caractères morphologiques de ces éléments sont très variables ; de là, des discussions dont ils sont encore l'objet chez les plantes supérieures, où pourtant les faits observés conduisent aussi à admettre qu'il existe, au moment de la division du noyau, des centres cinétiques, dont le rôle est analogue à celui des centrosomes les mieux différenciés.

Le rôle du noyau est capital dans la vie de la cellule et dans les phénomènes de la fécondation. La présence de ce corps a été démontrée dans tous les groupes de végétaux, à l'exception, toutefois, des bactéries. On doit à M. Strassburger et surtout à M. Guignard, d'avoir mis en évidence la ressemblance frappante qui existe, dans les phénomènes de la division du noyau, à la fois chez les animaux et chez les plantes ; ces savants ont constaté que, dans une même espèce, les noyaux des tissus végétatifs diffèrent, par un caractère important, des noyaux des cellules reproductrices. Cette différence porte sur le nombre des éléments chromatiques ou chromosomes, pendant la division indirecte ou karyokynèse ; dans les noyaux des cellules sexuelles, ce nombre est réduit à la moitié du nombre observé dans les noyaux végétatifs. De plus, le nombre de chromosomes, qui peut offrir des variations dans les noyaux végétatifs, est remarquablement fixe dans

les organes sexuels, fait probablement en relation avec la transmission des propriétés héréditaires. De plus, ce nombre est identique dans le noyau mâle et dans le noyau femelle qui s'unissent pour former l'embryon. La réduction numérique du nombre des chromosomes dans les cellules sexuelles apparaît comme nécessaire, pour que ce nombre ne devienne pas double à chaque végétation.

Des découvertes considérables ont été faites également dans l'étude des organes reproducteurs chez les végétaux. Le mode de transport de l'élément mâle vers l'élément femelle, qu'il doit féconder, avait permis, depuis longtemps, d'établir une différence profonde entre les phanérogames et les cryptogames. Chez les cryptogames, il ne peut avoir lieu que par l'intermédiaire de l'eau, et les gamètes mâles ou anthérozoïdes sont pourvus de mouvements, grâce auxquels ils vont rejoindre le gamète femelle ou oosphère. Chez les phanérogames, au contraire, le grain de pollen forme un tube plus ou moins long, qui pénètre dans les tissus et permet au gamète mâle d'arriver au contact du gamète femelle. Cette distinction classique doit être abandonnée ; en 1897, l'existence d'anthérozoïdes a été démontrée, presque simultanément, chez plusieurs phanérogames gymnospermes, notamment par M. Ikeno, dans une cycadée, et par M. Hirase, dans une conifère, le gingko. Chez ces plantes, le grain de pollen développe, comme chez les autres phané-

rogames, un tube pollinique, mais celui-ci n'atteint pas le sac embryonnaire ; à son intérieur, prennent naissance deux anthérozoïdes qui s'en échappent. On peut donc voir là des types de transition entre les cryptogames supérieures et les autres gymnospermes dépourvues d'anthérozoïdes. Cette découverte est d'autant plus intéressante que les cycadées actuelles et l'unique genre gingko sont les représentants de formes nombreuses de la période mésozoïque, qui ont fait leur apparition avec les autres gymnospermes encore vivantes.

Une découverte non moins importante est due aux travaux récents de M. Guignard et de M. Nawaschine. Ces deux observateurs ont montré, d'une façon indépendante, que, chez les angiospermes, l'ovule n'est pas simplement, comme on l'avait cru jusqu'ici, le siège d'une fécondation unique, donnant naissance à l'embryon qui constitue la partie essentielle de la graine : une seconde fécondation a lieu en même temps que la première et a pour conséquence la formation de l'albumen destiné à nourrir l'embryon. Les deux éléments mâles, amenés dans l'ovule par le tube pollinique, ont chacun un rôle déterminé : l'un s'unit au noyau de l'oosphère, l'autre au noyau secondaire. Ces deux copulations donnent naissance, d'une part à l'embryon, organisme définitif chargé de perpétuer l'espèce, d'autre part à l'albumen, tissu transitoire destiné à la nutrition de l'embryon. D'ailleurs, ces deux copulations ne sont

pas semblables entièrement ; les caractères de la sexualité, au point de vue de la réduction du nombre des chromosomes, n'existent que dans celle qui donne naissance à l'embryon, comme il résulte des observations de M. Guignard. La double fécondation permet de comprendre certains faits restés inexplicables chez les hybrides ; on se rend compte, en effet, maintenant que l'hybridité peut porter aussi bien sur l'albumen que sur l'embryon. Comme le fait remarquer M. H. de Vries, qui a spécialement étudié les hybrides du maïs : « Les expériences sur l'influence du pollen dans le croisement trouvent leur explication, vainement cherchée depuis plus d'un siècle, dans la remarquable découverte de la fécondation double, par M. Nawaschine et par M. Guignard. »

L'anatomie des tissus et des organes a donné lieu à de nombreux mémoires, parmi lesquels il faut citer les études de M. van Tieghem sur les racines. Elle a apporté aussi à la botanique systématique un secours des plus importants ; c'est ainsi que M. van Tieghem a revisé la classification d'un grand nombre de familles et montré combien étaient souvent insuffisants les caractères qui avaient servi à les établir, et l'illustre botaniste tente en ce moment d'édifier une classification basée sur la considération de l'œuf des plantes. En anatomie expérimentale, l'action du milieu sur la structure des plantes et les adaptations que celles-ci peuvent présenter dans les diverses

conditions de végétations ont préoccupé nombre d'observateurs. L'influence du climat alpin, en particulier, a été étudiée par M. Bonnier, grâce à des cultures comparées à des altitudes différentes, dans le but de rechercher non seulement de quelle manière le milieu extérieur modifie les diverses fonctions, mais aussi de quelle façon la forme et la structure de l'organisme se trouvent elles-mêmes influencées. M. Bonnier a constaté aussi que la lumière électrique permet d'obtenir les mêmes effets que la lumière solaire ; il a pu alors, avec la lumière électrique continue, réaliser des conditions suffisamment semblables à celles des contrées arctiques, et obtenir dans la structure des plantes les mêmes caractères que ceux qu'on observe naturellement dans les régions polaires.

Nous n'avons plus à revenir sur les progrès faits dans la connaissance des diastases, dont nous avons suffisamment parlé à propos de la chimie biologique. Les résultats obtenus dans l'étude de la chlorophylle ne paraissent pas encore définitifs. La réduction de l'acide carbonique, s'effectuant dans les feuilles par l'intermédiaire de la chlorophylle, est une opération endothermique nécessitant l'intervention d'une énergie étrangère, qui est, comme on sait, l'énergie solaire. Les diverses radiations du spectre ne sont pas également efficaces pour cet objet ; les bandes d'absorption d'une solution alcoolique de chlorophylle ont fait connaître la position

dans le spectre des radiations actives dans l'assimilation chorophyllienne, mais la question est loin d'être épuisée. Il y a d'ailleurs plusieurs chlorophylles, comme l'ont montré M. A. Gautier et M. Etard, même dans une seule plante, et cette constatation pourrait rendre compte de la formation de principes immédiats divers se réalisant dans les feuilles. Ajoutons qu'il existe certains animaux contenant des grains de chlorophylle; pour quelques-uns, il y a là une symbiose avec une algue unicellulaire; il semble que pour d'autres, comme certains infusoires, la chlorophylle se trouve incorporée dans le protoplasma même.

Nous avons fait allusion dans le chapitre précédent au mécanisme possible de la synthèse des hydrates de carbone dans les feuilles, tel qu'il a été envisagé par Baeyer : il y aurait là une polymérisation avec perte d'eau de l'aldéhyde formique formé par l'union directe du carbone et de l'eau. Une preuve au moins théorique en est fournie par les travaux de Fischer, qui a obtenu synthétiquement certains sucres avec l'aldéhyde formique.

La pénétration et la sortie des gaz sur lesquels la plante exerce son action ou qui sont produits par elle, ont été élucidées par un certain nombre d'auteurs, par M. Mangin surtout, qui a montré le rôle prépondérant joué par les stomates. Les recherches de Bonnier et Mangin avaient établi que, dans l'action chlorophyllienne seule, isolée de la respira-

tion, le dégagement d'oxygène surpasse toujours d'un cinquième au moins le volume de celui que renferme le gaz carbonique décomposé. Ce résultat, confirmé par les recherches de M. Schlœsing fils, amenait à rechercher dans la réduction des nitrates, mise en évidence par Schimper et d'autres auteurs, la cause de l'excès d'oxygène exhalé par les organismes verts soumis à l'influence de la lumière. Il n'est pas douteux que l'assimilation de l'azote minéral soit facilité par les radiations lumineuses. Toutefois, il existe une différence entre l'assimilation du carbone et celle des nitrates dans la nature des radiations efficaces, car, pour ce dernier phénomène, ce sont surtout les radiations violettes et ultraviolettes qui interviennent. Quant au mécanisme intime de l'assimilation des composés azotés, il est encore peu connu; mais il semble qu'il y ait lieu de distinguer deux phases : la formation des substances azotées non protéiques (amides, ammoniaque), et ensuite la formation des matières albuminoïdes avec l'aide des composés précédents. D'après les idées d'Armand Gautier, confirmées par les recherches de Treub, l'acide cyanhydrique semble être l'un des produits intérimaires de la synthèse des matières azotées.

Quoi qu'il en soit, la fonction chlorophyllienne, considérée uniquement par Boussingault comme la cause de la fixation du carbone, doit être entendue aujourd'hui dans un sens plus large, comme la fonc-

tion présidant à la synthèse des hydrates de carbone et des matières azotées.

Au point de vue de la nutrition carbonée, on a considéré longtemps qu'il y avait une opposition complète entre les plantes vertes et les végétaux sans chlorophylle, la totalité du carbone assimilé par les premières provenant du gaz carbonique, tandis que les seconds utilisent exclusivement les matières organiques. Il y avait là une erreur, et on sait aujourd'hui, que les plantes vertes ont la possibilité d'utiliser la nourriture organique.

Quoique bien spéciale en apparence, la question de la greffe végétale touche aux questions les plus élevées de la philosophie biologique. Un des résultats les plus saillants d'expériences récentes de Vöchting consiste en ce que toute cellule possède une polarité, je veux dire qu'elle a un haut et un bas, un côté droit et un côté gauche, qui diffèrent entre eux au point de vue de la facilité avec laquelle elles peuvent se souder. L'union normale ne se fait bien qu'entre la face supérieure d'une cellule et la face inférieure d'une autre, entre la moitié droite et la moitié gauche. A un autre point de vue, M. Daniel a porté son attention sur les rapports et l'influence réciproque du sujet et du greffon ; il a montré que l'opinion générale, d'après laquelle l'influence du sujet sur le greffon serait nulle, ce qui permet de reproduire et de conserver par la greffe une foule de variétés utiles, ne doit pas être admise dans un

sens absolu. Si, en effet, cette influence ne se manifeste que rarement d'une façon directe, elle peut se faire sentir d'une façon indirecte sur la descendance de la plante greffée. Les graines fournies par celles-ci sont parfois capables de donner des plantes offrant des caractères nouveaux, et ces caractères sont transmissibles par hérédité. La greffe semble donc pouvoir être employée dans certains cas pour obtenir des variétés ou des races nouvelles.

## II

### LES ORGANISMES INFÉRIEURS ET LES APPLICATIONS AGRONOMIQUES

L'étude des plantes et des animaux inférieurs a pris un développement considérable, quand on s'est rendu compte qu'on pouvait y trouver l'explication de bien des faits, vainement cherchée chez les êtres d'organisation supérieure. L'intérêt de ces études s'est encore accru quand les travaux de Pasteur ont montré le rôle immense joué par certains organismes inférieurs. Aussi, les champignons sont-ils actuellement l'objet d'un grand nombre de travaux. Cette classe de plantes présente d'ailleurs, au point de vue physiologique, une particularité intéressante, la plupart des champignons ressemblant aux animaux par le mécanisme intime de leur nutrition et ne pouvant comme eux utiliser directement l'énergie solaire ; ils vivent, par consé-

quent, aux dépens du carbone organique du sol ou du milieu qui leur sert de support ; ils sont parasites ou saprophytes.

L'étude des champignons appelle l'attention sur l'un des plus hauts problèmes de la biologie, je veux parler du problème de l'espèce. Si l'histologie a fourni le moyen de mieux circonscrire cet embranchement et d'opérer maints remaniements dans les classifications, les données immédiates de l'observation sont souvent restées insuffisantes, parce qu'elles ne portaient que sur des fructifications imparfaites. Il a fallu entrer de plus en plus dans la voie des cultures, en partant de semences pures. Mais on s'est aperçu que la question du terrain est plus complexe que celle de la semence. Tandis que les phanérogames ont une évolution fixe et déploient leurs organes dans un ordre de succession régulière, dès qu'elles ont un terrain favorable, les champignons, au contraire, produisent, dans des milieux différents, des formes végétatives variées et des fructifications polymorphes, dont l'apparition est livrée au hasard de la présence des milieux qui conviennent à chacune d'elles. Le milieu optimum, tel que l'avait conçu et réalisé Raulin, ne convient qu'à la manifestation d'une partie des propriétés d'une espèce ; l'optimum varie, pour une même espèce, suivant qu'on envisage telle ou telle particularité, comme le poids de la récolte, l'activité de la fermentation, la formation d'un organe repro-

ducteur. D'autre part, les classifications purement morphologiques peuvent être insuffisantes. Des travaux récents ont mis en évidence, dans certains cas, des différences nouvelles plus faciles à constater que les différences morphologiques. Des espèces, encore confondues par l'insuffisance de l'analyse morphologique, se séparent sur le terrain biologique. Ainsi, certaines urédinées hétéroïques ont un hôte commun sur lequel on ne parvient pas à les distinguer, mais se séparent sur le choix d'un second hôte. On comprend quelles difficultés il peut y avoir à établir la limite entre deux espèces sœurs et de simples races éthologiques.

Toutes ces études n'ont pas seulement un intérêt théorique ; elles ont eu de grandes conséquences pratiques. L'industrie des fermentations sous toutes ses formes a été transformée, grâce à l'étude biologique des levures et d'autres champignons et aux progrès de la chimie des ferments de ces végétaux. Nous parlerons plus loin des maladies de l'homme et des animaux produites par les bacilles qui appartiennent pour la plupart au groupe des champignons. L'étude des maladies des plantes a pris aussi un grand essor, et dans les traités sur ce sujet, comme celui de M. Prillieux, les champignons prennent une place de plus en plus envahissante ; ces champignons parasites sont l'objet de recherches biologiques qui permettent aux praticiens de réaliser une prophylaxie rationnelle. Ils jouent d'ail-

leurs quelquefois un rôle inattendu, et, récemment, M. Noël Bernard était amené à découvrir que la germination des orchidées exige la présence d'un champignon parasite.

La fécondation est indubitable chez certains champignons inférieurs, mais on tenait les champignons supérieurs, ascomycètes ou basidiomycètes, comme dépourvus de sexualité. M. Dangeard vient d'établir, chez ces champignons, l'existence d'une karyogamie intracellulaire qui est pour lui la reproduction sexuelle cherchée depuis si longtemps dans les champignons supérieurs.

L'histoire des algues n'est guère d'un moindre intérêt que celle des champignons ; leur extrême variété d'organisation a fourni aux histologistes et et aux physiologistes d'inappréciables matériaux de recherches. Les études de Thuret et de Pringsheim, puis de de Bary, Bornet et Cohn, sont depuis longtemps classiques. Plus récemment, on a signalé des faits extrêmement intéressants au point de vue de la physiologie générale de la reproduction, et établi que l'alternance des générations, loin d'être invariable chez certaines algues, est déterminée par les conditions extérieures. Il a été aussi constaté que, chez certaines algues, la pénétration réciproque des noyaux mâle et femelle se réalise parfois avec une extrême lenteur, la fusion des noyaux sexués n'ayant lieu qu'après un repos de plusieurs mois, au moment où l'œuf au repos va germer.

Le polymorphisme a été l'objet de nombreuses recherches, notamment de M. Sauvageau. Dans différents groupes d'algues, comme chez les bactéries, la plante est capable de s'adapter, dans une certaine mesure et promptement, aux conditions variables du milieu physico-chimique où elle vit; mais, jusqu'ici, on a toujours trouvé des limites à ce polymorphisme, et, si la notion d'espèce s'est trouvée étendue, elle n'a pas été profondément modifiée. Rappelons encore les symbioses entre algues et animaux, d'autant que les faits de parasitisme prennent aujourd'hui un intérêt considérable en biologie générale.

Les sciences agronomiques sont une application de la botanique; dans ce domaine, les vingt dernières années ont vu des découvertes d'un intérêt considérable. MM. Schlœsing et Müntz, en découvrant le ferment nitrique, ont fait voir, il y a vingt ans, que la nutrition végétale est en rapport étroit avec quelques-uns des microorganismes qui évoluent dans les profondeurs du sol, mais on était alors loin de penser que l'union de la plante avec la bactérie peut, chez certaines espèces, se changer en une véritable symbiose profitable à la végétation. C'est qu'en effet la vie du ferment nitrique reste indépendante; partageant la besogne avec son congénère, le ferment nitreux, il se développe aussi bien dans les sols nus que dans les terres cultivées, et M. Winogradsky l'a vu se reproduire dans des milieux de nature exclusivement minérale, ce qui montre

qu'il possède, comme les plantes à chlorophylle, la puissance d'assimiler le carbone de l'acide carbonique libre ou des carbonates, quoiqu'il soit incolore. En fait, il utilise pour cela l'énergie libérée par les réactions parallèles exothermiques qu'il est apte à mettre en train.

M. Berthelot avait reconnu, en 1886, que l'association de certains organismes aérobies avec les plantes de grande culture est favorable à celles-ci, en même temps qu'avantageuse pour le sol qui les porte : sous la seule influence apparente du temps, le sol s'enrichit peu à peu en azote, et d'autant plus qu'il nourrit une végétation plus active. Le gain est déjà sensible pour la terre nue, et il peut atteindre plusieurs centaines de kilogrammes par hectare et par an, pour une culture de légumineuses, par exemple la luzerne ; il cesse enfin de se produire quand la terre a été stérilisée par un chauffage préalable à cent dix degrés.

Ces résultats inattendus posaient encore une fois la grosse question de la fixation de l'azote gazeux, affirmée par Georges Ville, dès 1849. La discussion soulevée fut terminée par les expériences de MM. Hellriegel et Wilfarth, qui firent connaître le mécanisme à l'aide duquel les légumineuses fixent l'azote de l'air. Ces deux savants établirent que les nodosités des racines des légumineuses sont les organes nécessaires de cette fixation, qu'elles ne se développent jamais dans un milieu biologiquement

stérile, et apparaissent, au contraire, sûrement lorsqu'on ensemence ce milieu avec une trace de terre végétale chargée de germes microbiens.

Grâce à ces nodosités, les légumineuses peuvent se développer normalement, même en l'absence de tout aliment azoté ; les céréales qui, elles, n'en portent pas, restent insensibles à l'ensemencement, et dans aucun cas n'arrivent à contenir plus d'azote que n'en renfermait le sol.

Il fut établi que les nodosités des légumineuses sont de véritables réceptacles d'une bactérie polymorphe, le *Bacillus radicicola,* qu'il est possible de cultiver en bouillon sans lui faire perdre sa faculté caractéristique d'absorber l'azote de l'air et de déterminer par ensemencement l'apparition de tubercules sur les racines des légumineuses.

L'amélioration du sol par les légumineuses tient donc à ce que les plantes fixent directement l'azote de l'air, dont une partie reste en terre après la récolte, sous forme de débris de toute nature. L'amélioration des prairies naturelles, ainsi que l'enrichissement progressif des sols dénudés dans lesquels le *Bacillus radicicola* reste en repos, doit avoir une autre origine : c'est encore à des organismes inférieurs qu'il faut l'attribuer. Il résulte des travaux de MM. Th. Schlœsing et Laurent que, en présence de certaines espèces microbiennes encore mal définies, les algues vulgaires fixent aussi l'azote atmosphérique, à ce point que, sur un sol

pauvre, leur apparition influence favorablement les récoltes de graminées. Enfin, M. Winogradsky a isolé de la terre une bactérie anaérobie qui, dans un milieu mal aéré, au contact d'autres espèces aérobies, absorbe l'azote gazeux sans le concours des végétaux supérieurs.

Les enseignements qui ressortent de ces découvertes sont pour l'agriculture de tout premier ordre. Ils lui montrent que, pour améliorer la terre, il ne suffit pas, comme on le croyait autrefois, de lui donner une composition chimique convenable, par l'usage d'amendements ou d'engrais convenablement choisis, mais qu'il faut de plus faire d'elle un milieu de culture favorable à l'évolution des microbes créateurs ou modificateurs de la matière azotée : ils lui apprennent, en un mot, qu'il lui faudra désormais compter avec les infiniment petits et que l'absence de microbes dans la terre peut lui être aussi préjudiciable qu'un manque d'eau, de soleil ou d'engrais.

## III

### LA ZOOLOGIE ET LES IDÉES D'ÉVOLUTION EN BIOLOGIE

En zoologie, comme en botanique, les observateurs continuent, chaque jour, à compléter le répertoire des animaux. Les découvertes géographiques ont beaucoup contribué à cette extension

de nos connaissances, et l'exploration des grandes profondeurs océaniques a amené au jour des animaux jusque-là inconnus.

Comme nous le disions tout à l'heure, pour toute une partie de la biologie, la distinction entre zoologie et botanique est sans objet. Ainsi les recherches sur la division de la cellule concernent la biologie générale ; peut-être seulement sont-elles plus faciles sur les animaux que sur les plantes. Ces belles études sont surtout morphologiques ; si, voulant aller plus loin, on se demande quelle est la cause actuelle de cette division, on entre dans un domaine bien obscur, où il faut se méfier des explications de mots. Il y a sans doute une action du noyau sur le cytoplasme. Les stimulus chimiques doivent jouer un rôle important ; mais, à supposer même que l'on puisse mettre en évidence des diastases sécrétées par le noyau, dans quelle mesure aurait-on trouvé une explication de la division et de la différenciation cellulaires ? Nous avons indiqué (page 237) que l'étude plus approfondie des diastases et des colloïdes pourra peut-être apporter un jour quelque lumière sur ces questions, ou au moins suggérer quelque image utile. En attendant, nous ne pouvons guère pénétrer dans les mécanismes intimes du développement des organismes. Aussi, ne doit-on pas s'étonner que, dans certaines théories zoologiques, la méthode soit autre que dans les théories physico-chimiques. Elle a un caractère comparatif, et, en

quelque sorte, historique. Nous allons la voir à l'œuvre dans la doctrine de l'évolution, et son maniement demande des habitudes d'esprit quelque peu différentes de celles habituelles aux savants adonnés aux sciences qui sont entrées dans une période plus mathématique, et où le stade purement qualitatif est, si je puis dire, depuis longtemps dépassé. On peut penser que c'est là un état provisoire, car l'expérimentation s'introduit chaque jour en botanique et en zoologie, les questions morphologiques et l'expérimentation physiologique pratiquée dans les conditions strictes des sciences physiques devenant de plus en plus connexes.

La biologie tout entière est aujourd'hui dominée par l'idée d'*évolution*, idée qui est, d'ailleurs, un ferment puissant dans d'autres domaines, comme la philosophie, l'histoire, la sociologie. Deux problèmes distincts s'y rattachent : d'abord, la question de l'évolution d'un organisme individuel, c'est-à-dire du cycle des apparences qu'il présente depuis son origine dans l'œuf jusqu'à sa mort, et, en second lieu, l'histoire au cours des âges des organismes si complexes que nous rencontrons dans le règne animal et dans le règne végétal. Ce sont, suivant l'expression de Hæckel, l'*ontogénie* et la *phylogénie*.

L'ontogénie, ou embryogénie générale, est seule accessible à une étude scientifique directe. C'est aujourd'hui une partie de la science d'une importance capitale : quelques-unes de ses conclusions

sur le développement des êtres vivants paraissent définitivement acquises. L'embryogénie de la cellule, dont j'ai déjà parlé en botanique, a une grande part dans l'embryogénie générale. Les cellules constituant le corps d'un métazoaire se divisent de bonne heure en cellules somatiques et cellules gonadiales destinées à la reproduction, distinction qui se trouve chez tous les animaux et végétaux. La réduction karyogamique, capitale parce qu'elle prépare la fécondation, a fait, comme nous l'avons dit, l'objet en zoologie, comme en botanique, d'un grand nombre de recherches concordantes; peut-être une question reste-t-elle encore en suspens, c'est de savoir si cette réduction est seulement quantitative ou si elle est en même temps qualitative, point qui n'est pas sans importance pour certaines théories de l'hérédité.

Dans l'étude de la formation des êtres aux dépens de l'œuf fécondé, la théorie des feuillets blastodermiques domine la morphologie pure. On peut rattacher la conception des feuillets blastodermiques au nom de Huxley, qui avait été frappé de la similitude générale de constitution de tous les métazoaires, et de de Blainville, qui disait déjà dans ses cours : « L'homme est un tube digestif retourné ». Les anatomistes étaient ainsi arrivés à l'homologie des feuillets chez les divers animaux; c'était là, d'ailleurs, des analogies encore hypothétiques plutôt que de véritables homologies. Ces notions ont pu se préciser grâce aux progrès de la cytologie, et les

idées avancées par Huxley et de Blainville ont pu être vérifiées depuis, par suite des perfectionnements du microscope. On vit que, chez tous les êtres dont l'évolution est demeurée simple et explicite, il y avait un développement similaire ; c'est surtout à Kowaleski qu'on doit d'avoir montré, dans une série d'études sur des animaux de types très divers, qu'on rencontrait partout une même forme embryonnaire, désignée dès 1872 par Hæckel sous le nom de *gastrula* : celle-ci a un ectoderme, un mésoderme et un endoderme, et forme le premier stade normal dans la différenciation. Des travaux sans nombre ont été effectués, dans toute la série animale, sur le développement de cette forme primitive. La théorie de la gastrula permet de voir comment les métazoaires ont pu se constituer morphologiquement ; elle donne une base solide à l'anatomie comparée. Ainsi, chez les animaux supérieurs, l'ectoderme de l'embryon devient le tégument externe et tout ce qui en dérive, l'endoderme donne le tube digestif et ses annexes ainsi que le poumon ; le mésoderme donne les muscles, les vaisseaux, les séreuses. Quelques objections ont bien été élevées contre la théorie générale de la gastrula. Une des plus importantes a été tirée de l'embryogénie des éponges, mais il semble n'y avoir dans ces difficultés qu'une question d'interprétation sur la valeur donnée à la position topographique des feuillets.

L'étude approfondie du développement des organismes a révélé des faits extrêmement curieux. D'une façon générale et en gros, la ligne d'évolution d'un type organique est constante, mais il y a des cas où il en est autrement. Dans une même espèce aussi peu variable que possible à l'état adulte, on rencontre parfois des formes embryonnaires très différentes les unes des autres, lorsqu'on étudie le développement des embryons en divers points de l'habitat de l'espèce considérée ou dans des milieux différents : ce sont les cas que M. Giard, qui les a étudiés d'une manière très suivie, désigne sous le nom de *pœcilogonie*. Ainsi, certains crustacés, identiques à l'état adulte, offrent un développement différent suivant qu'ils vivent dans l'eau douce ou dans l'eau salée. Tous ces faits d'évolution plus ou moins condensée, sur lesquels M. Giard et M. Perrier ont appelé vivement l'attention, sont des plus importants pour l'embryogénie comparée, en même temps qu'ils apportent une preuve de la modification par les conditions extérieures. Ils se rattachent à une autre particularité non moins remarquable, la progénèse, cas dans lequel la reproduction sexuée se fait d'une façon plus ou moins prématurée, et qui rend plus compréhensibles les curieux phénomènes désignés autrefois sous le nom de générations alternantes. Que de faits importants seraient encore à citer, comme, par exemple, les phénomènes de castration parasitaire, magistralement étudiés par

M. Giard, qu'entraîne dans l'organisme d'un être vivant la présence d'un parasite agissant directement ou indirectement sur la fonction génitale de son hôte.

L'expérimentation, avons-nous dit plus haut, s'introduit de plus en plus en zoologie. D'un grand intérêt à cet égard sont les expériences de M. Boveri et de M. Delage sur la fécondation mérogonique, où une portion d'œuf sans noyau se montre susceptible d'être fécondée. Mais il faut citer surtout les expériences si curieuses de M. Loeb et de ceux qui l'ont suivi sur la parthénogonèse. L'éminent physiologiste de San-Francisco a montré le premier en 1899 la possibilité de faire évoluer des œufs non fécondés d'oursin jusqu'à des stades avancés sous l'influence de l'exitation de solutions salines, de telle sorte que dans ces mémorables expériences l'action du spermatozoïde est remplacée par celle de diverses dissolutions. Les premières solutions employées étaient des solutions de chlorure de potassium et de chlorure de magnésium. Lœb avait d'abord pensé que la pression osmotique joue seule un rôle dans le phénomène, mais il reconnut ensuite l'importance du métal. Delage s'est servi de l'acide carbonique pour produire le développement des œufs vierges d'Asterias glacialis; il les plonge, pendant l'expulsion des globules polaires, dans de l'eau de mer chargée d'acide carbonique, et arrête ainsi la maturation, puis replaçant ensuite les œufs dans l'eau de mer ordi-

naire, il voit le développement commencer régulièrement et se continuer presque jusqu'à la métamorphose. Il s'en faut que le déterminisme de tous ces phénomènes soit bien précisé, et les interprétations sont très nombreuses. Giard a insisté sur l'importance de l'anhydrobiose (c'est-à-dire sur le ralentissement des phénomènes vitaux sous l'influence de la déshydratation progressive), suivie d'une hydratation pendant laquelle les phénomènes vitaux sont augmentés, ce qui peut amener alors la parthénogénèse. Dans toutes les expériences jusqu'ici réalisées de parthénogénèse artificielle, les ovules traités ne forment pas de membrane, et la larve a une vitalité moindre que dans le cas de la fécondation par un spermatozoïde ; il semblerait que, dans des expériences toutes récentes, Lœb soit arrivé à des résultats beaucoup plus complets en plongeant l'œuf vierge dans une solution marine d'éther acétique après le traitement par une solution saline. On serait alors arrivé à obtenir artificiellement des conditions équivalentes (quoique, non identiques apparemment) à celles que réalise la pénétration du spermatozoïde. Quoi qu'il en soit, les célèbres expériences commencées par Loeb et continuées par un grand nombre de biologistes donnent un nouvel essor aux tentatives de théories physico-chimiques de la vie, en cherchant à éclairer le déterminisme physico-chimique d'un des *mystères* les plus profonds que nous offre la nature vivante, celui de la fécondation.

Il y a d'ailleurs tout lieu de penser que les expériences de Lœb se trouvent parfois réalisées dans la nature; il y a des cas connus de parthénogénèse naturelle chez les échinodermes, et ces cas semblent limités à des habitats où les eaux sont chargées de certains sels. On doit encore, quoiqu'il s'agisse d'animaux différents, rattacher à l'ordre d'idées suggéré par les expériences de Lœb des recherches récentes sur le cycle évolutif des Infusoires, en particulier sur la Paramécie. Après un certain nombre de générations agames scissipares, les infusoires manifestent, comme on le sait depuis Maupas, une dégénérescence et meurent si la conjugaison n'intervient pas. Or on peut obtenir le rajeunissement en transportant pendant quelque temps la Paramécie vieillissante dans un milieu convenable, et ce traitement a pu être pratiqué plusieurs fois. Heureuses Paramécies, pour lesquelles on a trouvé une eau de Jouvence!

## IV

### LES DOCTRINES TRANSFORMISTES

Si *l'ontogénie* est accessible à une étude scientifique directe, il n'en est pas de même de la *phylogénie*, du moins si l'on pose le problème phylogénique dans toute sa généralité. Les observations des zoologistes, complétées par les données de la paléontologie, ont démontré de la manière la plus nette la plasticité d'un grand nombre d'espèces. Ces variations ont donné à penser que toutes les espèces vivant actuel-

lement proviennent d'une souche commune. Une telle hypothèse prise dans sa généralité n'est évidemment pas susceptible d'une véritable démonstration ; elle joue dans la biologie moderne le rôle de postulat et constitue une théorie, extrêmement féconde, qui est devenue un admirable instrument de recherche et de travail. La théorie de la descendance, comme toutes les théories vraiment utiles, permet de relier les faits épars, elle rend compte de détails d'organisation et de développements et permet même d'en apercevoir de nouveaux. En poursuivant le but probablement chimérique de dresser l'arbre généalogique des animaux et des plantes, le naturaliste moderne, guidé par l'idée de l'évolution, est conduit à étudier l'action des milieux et à séparer ce qui, dans le développement, revient à ceux-ci, et ce qui est l'héritage d'ancêtre disparus.

La théorie transformiste a pour elle qu'on ne peut concevoir une autre théorie scientifique qui la remplacerait utilement. A la vérité, on pourrait être tenté de faire les remarques suivantes un peu décourageantes. Nous ignorons absolument les conditions favorables dans lesquelles la matière a pu s'organiser et devenir vivante. Sans doute, dans les conditions expérimentales actuellement réalisables par nous, la génération dite spontanée est impossible ; mais dans la succession des âges géologiques ces conditions favorables ont pu se trouver réalisées, non pas seulement une fois, mais un grand nombre de fois. Les souches initiales, dira-t-on,

peuvent donc être en grand nombre, et c'est un vain effort de dresser les grands arbres généalogiques que nous voyons maintenant dans les traités, et sur lesquels les zoologistes sont loin d'être d'accord. Certaines observations montrent que cette argumentation renferme quelque part de vérité, et que des filiations diverses sont possibles, comme il arrive pour la formation des genres *Equus* et *Rhinocéros* en Amérique et en Europe. Mais, un tel point de vue renfermant trop d'intermination, les biologistes ne s'y sont encore guère arrêtés, suivant d'abord les conséquences des hypothèses les plus simples ; cependant quelques paléontologistes, comme M. Depéret, cherchent dans leurs travaux à se placer à un point de vue plus général.

Lamarck, le vrai fondateur longtemps méconnu de la théorie de la descendance, avait autrefois insisté sur un des facteurs primaires de l'évolution, l'usage, et sur l'hérédité des effets acquis par l'usage. Au nom de Darwin se rattachent surtout les facteurs secondaires, la sélection naturelle, par laquelle se fixent les variations, et la concurrence vitale ; ce n'est qu'avec une extrême réserve que le grand naturaliste anglais a abordé l'action des milieux. Peu de biologistes attachent aujourd'hui à la sélection naturelle l'importance que leur attribuait Darwin ; elle est un processus conservateur et accélérateur, mais non édificateur. L'antagonisme subsiste cependant encore entre *néo-Lamarckiens* et *néo-Darwiniens ;* certains naturalistes nient l'hérédité des

caractères acquis, et il en est, comme Weissmann, qui complètent la sélection des variations accidentelles par une théorie de la continuité du plasma germinatif.

La liste est longue, telle que la donne Giard, des facteurs primaires, directs ou indirects, de l'évolution et des facteurs secondaires. Tout en tenant compte de l'action des causes extérieures sur l'avenir d'un être, on ne doit pas, semble-t-il, méconnaître une prédétermination réelle, celle-ci pouvant être rattachée, dans une certaine mesure, aux causes actuelles, mais ayant agi antérieurement et déterminant dans l'œuf les conditions dans lesquelles il évolue : ce sont ces virtualités que nous désignons sous le terme vague d'*hérédité*.

Le mot d'hérédité est déjà venu sous ma plume plusieurs fois à propos de mécanique, et j'ai eu l'occasion de dire que les mécaniciens, dans les phénomènes mécaniques avec hérédité, se plaçaient à deux points de vue : pour les uns l'hérédité mécanique n'étant qu'apparente, tandis qu'elle est réelle pour les autres (page 125). J'oserai risquer une comparaison, peut-être un peu boiteuse comme beaucoup de comparaisons ; les premiers sont à rapprocher des néo-Darwiniens et les seconds des néo-Lamarckiens.

Quoi qu'il en soit des mécanismes intimes du transformisme, c'est de l'embryogénie et de la paléontologie que les naturalistes tirent les preuves

positives les plus fortes de l'évolution des êtres vivants. De bonne heure, l'attention fut appelée sur le perfectionnement progressif des êtres rencontrés dans les différents étages géologiques, quand on part des périodes les plus anciennes. C'est ainsi que, pour les végétaux, on voit successivement apparaître les végétaux inférieurs, les cryptogames vasculaires, puis les phanorégames, gymnospermes et angiospermes, et parmi ces derniers les monocotyledones et les dicotyledones. Il en est de même du monde animal, où, au moins dans les grandes lignes, les êtres présentent avec le temps un degré croissant de différenciation. Quelque inexactes qu'aient pu être, parfois les idées et les interprétations émises au sujet du mot *progrès*, on doit reconnaître un perfectionnement, qui a pu subir des régressions, mais dont le sens, à prendre les moyennes, est toujours resté le même. Une étude approfondie a montré des difficultés dont on ne s'était pas d'abord avisé ; mais on a réussi souvent à en donner des explications par des interprétations plus précises de la théorie de la descendance, particulièrement en cherchant à se rendre compte de l'influence des milieux. Il est à peine besoin de citer des exemples de cette évolution progressive des êtres vivants; un des plus caractéristiques est offert par les reptiles et les oiseaux, réunis les uns aux autres par les reptiles volants, les premiers oiseaux étant pourvus de dents comme les reptiles. Nous reviendrons tout

à l'heure sur quelques récents travaux paléontologiques.

Nous avons parlé plus haut de l'ontogénie ou embryogénie générale. Avant d'arriver à l'état adulte, l'animal passe par une série de formes, et, d'après la loi de *Serres* et de *Fritz Muller*, ces formes sont la répétition des formes ancestrales par lesquelles a passé l'espèce : c'est ce qu'on a exprimé en disant que *l'ontogénie répète la philogénie.* Il peut y avoir d'ailleurs dans ce processus des accélérations ou même des lacunes. La loi de Serres a donné l'explication de bien des singularités, comme les organes rudimentaires présentés par certains animaux à l'état embryonnaire et même conservés à l'état adulte. On sait par exemple que le perroquet actuel possède à l'état embryonnaire des dents qu'il ne possède plus à la naissance. Il y a dans toutes les classes du règne animal un ensemble de causes accélératrices des phénomènes embryogéniques ; c'est à cet ensemble de causes que Edmond Perrier donne le nom de *Tachygenèse.* Pour pouvoir parler d'accélération embryogénique, il faut nécessairement une ontogénie, *regardée comme normale*, avec laquelle on puisse faire la comparaison. Perrier pense retrouver une telle ontogénie, présentant en quelque sorte le maximum de lenteur, dans les formes inférieures de chaque classe du Règne animal, et c'est ainsi qu'il classe les faits embryogéniques essentiels.

Quand on pense à la transformation des espèces, on a presque toujours en vue une évolution très lente, et on compte pour cela sur la longue durée des temps géologiques. En fait, il se pourrait que, au moins à de certains moments, les choses se soient passées tout autrement. C'est ce que tendent à montrer les récentes expériences de M. Hugo de Vriès, qui a obtenu des résultats extrêmement remarquables dans la culture de certaines Œnothera. Des types nouveaux se sont montrés subitement, sans intermédiaires ni préliminaires, et sept espèces d'Œnothera ont été ainsi produites. Il est bien probable que ces variations *brusques* sont relatives à nos moyens d'observations ; si nous pouvions entrer dans le détail du mécanisme vital, si, pour reprendre une expression dont nous nous sommes bien des fois servi, nous pouvions apercevoir, non seulement les variables apparentes, mais aussi les variables cachées, nous trouverions vraisemblablement une continuité dans la transformation, mais avec une énorme accélération pour certaines variables, à un moment donné. On formulerait de la manière suivante le résultat essentiel des expériences de M. de Vries : il peut arriver qu'une espèce paraisse varier, en général, avec une extrême lenteur, mais qu'*à certains moments critiques de la vie de l'espèce*, la variation prenne une accélération énorme ; une nouvelle espèce semble alors se produire *brusquement*. Ainsi les variations

d'une espèce à une autre ont pu, dans le temps, être très rapides, et alors on est moins étonné de l'absence de certains types intermédiaires dans la succession des terrains géologiques; c'est là un point sur lequel nous reviendrons en paléontologie.

Ces vues générales sur la *mutation* sont sans doute appelées à un très grand avenir. C'est dans cette voie féconde que les recherches relatives au transformisme doivent être poursuivies; on pourra y trouver une démonstration expérimentale du principe de la descendance. Rien, en tous cas, ne peut frapper davantage l'attention de tout esprit philosophique que l'apparition soudaine d'espèces nouvelles. Peut-être arrivera-t-on à trouver des conditions expérimentales mettant une plante dans cet état *d'affolement* précédant les variations brusques; c'est ce qu'autorisent à penser les expériences de M. Blaringhem relatives à l'action des traumatismes sur la variation et l'hérédité.

Quant à la reconstitution généalogique des animaux et des plantes, qu'on trouve aujourd'hui dans les travaux de la nouvelle école embryogénique, elle est très utile, pourvu que l'on n'ait pas la prétention d'affirmer que ces arbres sont l'expression exacte de la vérité; ils sont surtout intéressants quand on les limite à certains groupes bien définis du règne animal. Dans cette tentative, rendue déjà si difficile par l'insuffisance des données paléonto-

logiques, un obstacle considerable surgit à chaque instant : je veux parler de la *convergence* des espèces, fait remarquable sur lequel ont insisté de nombreux naturalistes, parmi lesquels MM. Giard et Carl Vogt, consistant en ce que des types phylogénétiquement séparés deviennent, grâce à certaines influences biologiques, entièrement semblables dans leur apparence extérieure. Mais, nous l'avons déjà dit, si le but est quelque peu chimérique, il conduit à une méthode de travail d'une merveilleuse fécondité, et l'idée d'évolution domine aujourd'hui toutes les sciences biologiques.

On a pu voir, par ce qui précède, combien nous avions raison de dire plus haut que la méthode était actuellement différente en physico-chimie et dans certaines parties de la biologie, et demandait des qualités d'esprit différentes de celles du physico-chimiste. Les êtres vivants certes sont soumis aux lois physico-chimiques, et leur étude est par là du domaine des physiciens et des chimistes; mais ils subissent à tout instant et ont subi à travers la série indéfinie des générations dont ils descendent l'action variable des agents extérieurs. Les espèces sont plus ou moins malléables; elles subissent l'action des milieux depuis un temps plus ou moins long. Enfin l'hérédité a fixé, à des degrés différents aussi, les caractères déterminés par les agents physico-chimiques. Ces données, essentiellement biologiques, des problèmes relatifs à l'action des agents

physico-chimiques sur les êtres vivants, opposent à leurs solutions d'immenses difficultés.

## V

### LA DISTRIBUTION DES ÊTRES VIVANTS ET LA PALÉONTOLOGIE

Sous l'influence de l'idée d'évolution, des études qui n'étaient autrefois que de simples objets de curiosité, ont pris une importance considérable. Telle est l'étude de la distribution géographique des êtres vivants, où on peut aller chercher des documents pour ou contre la parenté présumée de telles ou telles formes d'animaux et de végétaux.

Dans le monde animal, les grandes explorations sous-marines effectuées depuis vingt ans ont conduit à des résultats remarquables. « Les récoltes réalisées, dit M. Edmond Perrier, qui a fait de cette question une étude approfondie, ont dépassé tout ce que l'imagination pouvait rêver. Une multitude de formes nouvelles ont été ajoutées aux listes déjà si longues des zoologistes ; ce sont, en général, des formes spéciales, apparentées tout aussi bien aux espèces actuelles qu'aux espèces anciennes, alliées à beaucoup de nos formes littorales, mais ayant leur cachet particulier, portant l'empreinte de leur étrange existence et constituant un ensemble que l'on a justement caractérisé du nom de *faune des abîmes.* »

A son tour, depuis vingt ans environ, la géographie botanique est entrée dans une voie nouvelle? elle est sortie de son état d'indécision pour prendre les allures d'une science établie, avec un programme nettement défini. Il fallait coordonner les faits innombrables accumulés par des voyageurs. Les uns ont mis en relief les rapports de la végétation avec le milieu et le climat, d'autres se sont occupés de l'aire de dispersion des espèces et des différents groupes : d'autres, enfin, ont abordé le problème du développement des végétaux à travers les âges. En particulier, la botanique écologique, c'est-à-dire la botanique traitant des rapports qui existent entre les organismes et le monde extérieur, cherche à déterminer comment les plantes subissent l'influence des forces extérieures, de la température, de la lumière, des aliments, etc., et comment elles y adaptent leurs formes. Le traité de M. Warming et le magistral ouvrage de M. Schimper tiennent une place considérable dans l'œuvre de ces vingt dernières années. Une phalange de botanistes ont abandonné leurs laboratoires pour demander aux pays lointains de nouveaux sujets d'études, et, en quelques années, leurs observations ont fourni à la physiologie expérimentale une foule de faits nouveaux qu'elle soumet à son contrôle et qu'elle cherche à expliquer. Ainsi, pour prendre un exemple, les observations de M. Bonnier et de M. Flahaut, en Scandinavie, et les cultures de M. Bonnier dans les

Alpes, ont précisé les relations des plantes arctiques et alpines avec les climats sous lesquels elles vivent; des faits, comme la transformation, sous l'influence des climats polaires, d'une espèce annuelle en une espèce bisannuelle, et de celle-ci en une espèce vivace, sont d'une haute portée.

De la phytogéographie à la botanique fossile, la transition est immédiate. Comme le disait déjà de Candolle, la géographie botanique doit avoir pour but principal de montrer ce qui, dans la distribution actuelle des végétaux, peut s'expliquer par les conditions actuelles des climats et ce qui dépend des conditions antérieures. La question est serrée de plus en plus près à mesure que des données plus anciennes et plus nombreuses sont fournies par la paléobotanique. Celle-ci s'est notablement développée depuis quinze ans, et quelques résultats généraux doivent être notés.

La présence d'un microbe dans le terrain houiller de Saint-Étienne avait été signalée autrefois par M. van Tieghem; on doit à M. Bernard Renault une étude approfondie des bactériacées fossiles qui se montrent en abondance dans presque tous les débris organiques fossiles. Ainsi qu'on devait s'y attendre, on retrouve, dans les combustibles fossiles eux-mêmes, des bactériacées en abondance, et M. Renault pense qu'elles ont été les agents de la transformation en houille ou en lignite. Les travaux de M. Zeiller sur les végétaux des périodes paléozoïques et

secondaires, ont apporté une importante contribution à la botanique fossile ; quelques-uns ont résolu des questions controversées sur certains caractères distinctifs entre les cryptogames vasculaires et les gymnospermes, question dont l'intérêt s'étend à la botanique générale. Le savant paléontologiste a publié, il y a quelques années, un traité de botanique fossile qui donne l'état actuel de cette partie de la science. On doit, naturellement, chercher à dégager les renseignements que les observations actuellement acquises sont susceptibles de fournir sur le problème des liens génériques qui peuvent exister entre les divers types végétaux qui se sont succédés à la suface du globe. Il paraît ressortir d'un examen attentif que les groupes principaux du règne végétal, embranchements et classes, et dans chaque classe, les groupes génériques se sont montrés dès les époques les plus anciennes. Cependant certains types éteints, s'intercalant entre ceux que nous observons aujourd'hui, viennent augmenter le nombre des termes de la série, et établissent parfois des liaisons entre des groupes aujourd'hui bien tranchés ; c'est ainsi qu'il semble exister des intermédiaires entre les fougères et les cycadinées. Par contre, tout indice de filiation nous échappe en ce qui concerne les angiospermes. On peut dire, d'une manière genérale, avec M. Zeiller, que l'on constate actuellement l'existence de séries plus ou moins discontinues, à termes assez rapprochés, pour que

l'on doive conclure à une évolution progressive, mais dans laquelle les modifications se seraient le plus souvent opérées assez rapidement pour que nous ne puissions pas les saisir sur le fait. Il n'y a pas lieu d'être étonné de cette conclusion, si on se rappelle ce que nous avons dit plus haut des variations brusques en signalant les expériences de M. H. de Vries sur les mutations. D'ailleurs, M. Grand'Eury a signalé récemment les mutations de quelques plantes fossiles du terrain houiller. Il semble que, pendant l'énorme durée des temps carbonifères, plusieurs espèces soient restées permanentes pendant de longues périodes, subissant seulement à certains moments des transformations rapides.

Les conclusions auxquelles nous venons d'arriver en paléontologie végétale s'appliquent, dans une large mesure, à la paléontologie animale. Ici, d'ailleurs, l'abondance des documents est bien autrement considérable. D'importantes trouvailles ont été faites, qui sont venues combler plusieurs lacunes. Chez les vertébrés, on doit signaler particulièrement les reptiles pareiasauriens du permien du nord de la Russie, identiques avec ceux de l'Afrique australe et recueillis avec les débris de la même flore. D'autre part, depuis trente ans, les descriptions des dinosauriens se sont multipliées; on connaît les iguanodons de Bernissart, qui excitent, au musée de Bruxelles, la stupéfaction du public et

l'admiration des naturalistes ; mais ce sont surtout les dépôts secondaires des Montagnes Rocheuses aux États-Unis qui fournissent les débris les plus complets et les plus nombreux de dinosauriens. Ils ont été étudiés par Marsh et M. Cope, et on peut voir, au musée de New-York, une merveilleuse collection de ces étranges reptiles, dont le port est parfois celui des mammifères, et dont quelques-uns se rapprochent des oiseaux par leurs caractères ostéologiques. Certains d'entre eux étaient gigantesques, comme l'Atlantosaurus, dont Marsh estime la longueur à plus de 35 mètres, et le Brontosaurus, dont le squelette complètement connu a une longueur de 20 mètres.

Nos connaissances se sont aussi augmentées sur les faunes qui ont vécu jadis en Patagonie ; les mammifères de cette partie de l'Amérique ont, au point de vue évolutif et phylogénique une réelle importance. Les découvertes récentes faites principalement par C. et F. Ameghino, nous ont révélé, dans cette région australe, un centre de dispersion prodigieusement riche et tout à fait indépendant des autres centres déjà connus de mammifères fossiles. L'âge de ces faunes tertiaires de Patagonie est encore un sujet de discussion entre les géologues, les uns les faisant débuter avec le Crétacé supérieur, d'autres seulement avec l'Eocène plus ou moins récent. On les a partagées en quatre groupes, le dernier correspondant au pliocène, renfermant seul des types

de l'Amérique du Nord et établissant que vers la fin des temps tertiaires une communication s'est établie entre les deux Amériques sur l'emplacement de l'isthme de Panama.

Les vertébrés fossiles, dont on tente de belles restitutions, attirent surtout l'attention du public; non moins utiles à bien des égards, sont, pour le géologue, les restes des invertébrés. Un résultat remarquables de ces vingt dernières années est la découverte, dans les régions himalayenne, indienne et sibérienne, de riches faunes de céphalopodes faisant connaître les types marins d'étages (houiller, permien, trias) qui n'étaient guère connus en Europe que par leurs types continentaux. La connaissance de l'évolution de ces mollusques dibranchiaux y a beaucoup gagné en précision, et on peut maintenant suivre avec sûreté toutes les phases du développement de la grande famille des ammonoïdés, si précieuse pour la classification rigoureuse des étages, depuis le dévonien jusqu'à la fin des temps secondaires; les recherches de M. Munier-Chalmas et de M. Douvillé sur les loges et les cloisons des ammonites, sont dans cette question d'un haut intérêt. M. Douvillé a insisté sur la valeur variable des fossiles pour l'étude des enchaînements du règne animal. Ceux qui évoluent rapidement sont, suivant son expression, de *bons fossiles;* ils permettent d'apprécier des intervalles de courte durée. D'autres évoluant beaucoup moins rapide-

ment et persistant sans modifications appréciables pendant une ou plusieurs périodes géologiques, sont de *mauvais fossiles*; ceux-ci correspondent sans doute à des espèces qui se sont transformées brusquement, au sens où nous l'entendions tout à l'heure en parlant des Œnanthera de de Vries. Parmi les premiers, on peut citer les ammonites avec leurs cloisons si caractéristiques et les rudistes, puis aussi à partir de l'époque secondaire, les vertébrés, dont dans des ouvrages magistraux M. Albert Gaudry nous a retracé les enchaînements, que l'on peut suivre au Muséum d'Histoire naturelle dans l'admirable galerie qui fait si grand honneur à la Paléontologie française.

J'ai dit, en parlant des mutations, pourquoi il était probable que certains types de transition ne pourraient jamais être découverts. Il faut, au reste, dans ces questions, apporter une grande prudence, et les migrations peuvent avoir joué un rôle très important. M. Depéret a beaucoup insisté sur ce point, en ce qui concerne les mammifères tertiaires; il y a eu des changements de faunes par voie de migration. Une autre question se pose aussi en paléontologie, et il n'en est pas de plus captivante : elle est relative au moment des premières apparitions de la vie à la surface de la terre. Malheureusement, on connaît bien peu de fossiles au-dessous du terrain cambrien : ce sont des traces de radiolaires, des débris de crinoïdes

rencontrés par M. Barrois dans la Bretagne qui fournit jusqu'ici les plus anciennes formes vivantes connues sur la terre. On a quelques raisons de croire que cette faune est loin d'être la faune vraiment primordiale, mais, peut-être, ne doit-on conserver que peu d'espoir de rencontrer des fossiles dans les sédiments précambriens, à cause du métamorphisme subi par ces terrains. Il faudrait alors perdre tout espoir de remonter plus avant dans l'histoire de la vie sur notre planète.

## CHAPITRE IX

### La Médecine et les théories microbiennes.

---

S'il est une partie de la science se trouvant actuellement dans une transformation complète, et qui soit à un véritable tournant de son histoire, c'est assurément la médecine. Non pas que l'observation clinique doive être suivie avec moins de soin que par le passé; elle sera toujours essentielle pour le médecin praticien qui doit analyser les symptômes morbides permettant d'établir sûrement un diagnostic. Nulle part peut-être, depuis quarante ans, l'analyse de ces symptômes n'a été poussée plus loin qu'en neuro-pathologie; elle amena en particulier la découverte des lésions systématiques de l'axe nerveux, des lésions de l'aphasie, de la cécité et de la surdité verbales; mais la médecine clinique, art en même temps que science, ne peut rentrer dans le cadre de ce livre. Dans ce court chapitre final, nous indiquerons seulement quelques applications à la

médecine des études microbiennes et de celles qui en dérivent.

Sous l'influence des progrès de la physiologie, la médecine, peu à peu, a cessé de se confiner uniquement dans l'observation, et les faits observés ont suggéré des expériences, quelquefois sur l'homme, le plus souvent sur les animaux. C'est ainsi que la médecine a été naturellement conduite à devenir expérimentale, et on peut rattacher surtout à cette transformation le nom de Claude Bernard, dont un beau livre a précisément pour titre : *La Médecine expérimentale*. Une des plus importantes découvertes du grand physiologiste est celle des sécrétions internes dont le rôle apparaît, de plus, considérable, soit pour la constitution du sang, soit pour l'établissement d'une sorte de solidarité humorale entre toutes les parties de l'organisme; l'exemple le plus remarquable que l'on puisse citer des sécrétions internes est la formation des matières sucrées qui a lieu dans le foie. Quelques-unes des sécrétions internes sont sans doute à rapprocher des ferments solubles sécrétés par les cellules, des ptomaïnes et leucomaïnes, toxines et antitoxines, sur lesquels les recherches de M. Armand Gautier et de M. Bouchard appelèrent d'abord l'attention, et qui font aujourd'hui l'objet de tant de travaux. A un point de vue pratique, on se rappelle les tentatives de Brown-Sequart et celles de plusieurs de ses élèves, pour fonder une opothérapie; seule l'opo-

thérapie thyroïdienne s'est montrée d'une réelle efficacité dans le cas du goître et du crétinisme.

La transformation de la médecine, commencée sous l'influence des physiologistes, s'est prodigieusement accélérée à la suite des incomparables découvertes de Pasteur. Les études microbiologiques ont alors envahi toute une partie de la médecine. A la place d'entités morbides et de mots souvent vides de sens, apparurent des organismes microscopiques, véritables causes de la maladie, d'autant que, dans ce qu'on pourrait appeler l'âge d'or des découvertes pastoriennes, on ne vit que le microbe, laissant ainsi de côté une moitié du problème. Comme il arrive souvent dans toute étude nouvelle et féconde, après l'âge héroïque où tout paraît simple, les difficultés se présentèrent. Il fallut tenir compte de la résistance de l'organisme contre l'agent infectieux; on dut chercher à l'expliquer, ainsi que les phénomènes d'immunité que venait de découvrir Pasteur, sous peine de rentrer dans la phraséologie tant reprochée à la médecine d'autrefois. C'est à quoi on travaille depuis plus de vingt ans avec une merveilleuse ardeur : les faits nouveaux s'accumulent, des explications au moins partielles s'ébauchent, et la nosologie, les conceptions étiologiques, la thérapeutique se trouvent transformées.

Nous avons déjà vu plus haut le rôle important des bactéries en chimie, en botanique et en agro-

nomie ; nous devons maintenant dire un mot des maladies infectieuses et des doctrines qui se sont développées à la suite des découvertes de Pasteur. Dès le début, une difficulté se présente relativement au polymorphisme des microbes. Parmi les microbiologistes, les uns se prononcent pour la spécificité absolue. Pour d'autres, les espèces microbiennes ne sont pas aussi nettement délimitées; le bacille tuberculeux, par exemple, existe sous plusieurs formes différentes par leur virulence vis-à-vis de certains animaux, et on connaît aussi une série de bacilles pseudodiphtériques. Il est probable que ce sont là seulement des variétés d'une même espèce.

Passons rapidement en revue quelques maladies infectieuses. Le microbe du choléra et celui de la tuberculose ont été découverts par M. Koch en 1882. Lors de l'épidémie de Hambourg, en 1892, on a découvert dans l'eau une série de microbes ressemblant beaucoup aux vibrions cholériques; en cultivant ce vibrion dans l'eau peptonisée, on a obtenu sa toxine, c'est-à-dire le poison qu'il sécrète. Le microbe de la peste fut découvert, en 1894, par M. Yersin : c'est un bâtonnet court et ovale, doué de motilité, assez semblable à celui du choléra des poules. Pour la diphtérie, MM. Roux et Yersin ont fait en 1889, l'étude complète du poison diphtérique, à la suite de laquelle M. Behring a découvert la sérothérapie diphtérique appelée à un si grand avenir et dont MM. Richet et Héricourt

avaient antérieurement posé le principe. Le bacille du tétanos a été décrit pour la première fois par M. Nicolaier, en 1885, et M. Kitasato a fait une étude approfondie de la redoutable toxine sécrétée par ce microbe. Le microbe de la lèpre a été découvert en 1870 par le médecin Norvégien Hansen, mais on n'a pas jusqu'ici réussi à le cultiver; ce bacille a une grande affinité pour le tissu nerveux, et les conditions de sa vitalité paraissent très étroites. Rien de net ne se dégage des nombreuses études faites sur le cancer; plusieurs théories sont en présence, théorie coccidienne, théorie blastomycétienne, d'après laquelle il y aurait une levure pathogène, et enfin théorie de la spécificité cellulaire faisant résulter le cancer d'une évolution anormale des cellules de l'organisme.

Il y a des maladies à caractère infectieux, qui sont certainement microbiennes, mais dont on n'a pu trouver le microbe tant qu'on a opéré dans les conditions ordinaires avec le microscope. Pour deux d'entre elles, en se servant des perfectionnements apportés dans l'emploi du microscope, et dont nous avons dit précédemment un mot, il a été possible d'apercevoir le microbe. Tel est le microbe de la péripneumonie des bête à cornes, signalé par MM. Cotton et Mouton; tel est aussi le microbe de la fièvre aphteuse. La rage et la variole sont sans doute des maladies à microbes encore invisibles pour nous; après les conquêtes précédentes dans la

visibilité, il y a lieu d'espérer qu'on pourra quelque jour démontrer avec précision leur existence.

Les microbes bactériens, que l'on s'accorde à ranger parmi les végétaux et spécialement les champignons, ne sont pas les seuls êtres produisant les maladies infectieuses. Il y a, parmi les sporozoaires, qui sont de petits animaux microscopiques et unicellulaires, et particulièrement parmi les grégarines et les coccidies, des agents de maladies redoutables. Tel est l'hématozoaire de Laveran, qui est l'agent pathogène du paludisme, endémie dont l'empire est immense, et qui constitue le principal obstacle à l'acclimatement des Européens dans la plupart des pays chauds. Rien n'est plus curieux que le cycle évolutif de l'hématozoaire du paludisme, tel qu'il résulte des travaux de Laveran, de Grassi, de Ross et de plusieurs autres. L'hématozoaire partage son existence entre les globules rouges du sang de l'homme et l'intestin d'un moustique du genre anophélès. Introduit dans le sang humain par la piqûre de ce moustique, il se fixe dans le globule rouge et a alors l'apparence d'une petite masse sphérique. Au bout d'un temps déterminé, qui correspond à la période de la fièvre, et pendant lequel il a détruit le globule sanguin ou hématie, il se segmente, se répand dans le sang et va se fixer dans d'autres hématies. Cette succession de phénomènes se continue pendant un certain temps, mais ces générations agames s'épuisent, et, à un certain moment,

on voit apparaître des formes sexuées, mâles et femelles. Toutefois leur conjugaison n'est pas possible dans le sang humain, et, si une circonstance particulière ne se produit, ces éléments meurent sans laisser de postérité. La circonstance en question est la piqûre par un nouveau moustique, qui fera pénétrer ainsi dans son intestin les formes mâles et femelles, dont il vient d'être question. Dans ces nouvelles conditions, la conjugaison sera possible, et nous revenons à la forme initiale de l'hématozoaire, qu'une nouvelle piqûre pourra introduire dans l'organisme humain. On comprend que la connaissance complète des transformations de l'agent infectieux ait permis d'instituer une prophylaxie rationnelle du paludisme.

Il est une autre maladie redoutable dans le développement de laquelle un moustique joue un rôle essentiel ; c'est la fièvre jaune. Son micro-organisme, jusqu'ici invisible, est un parasite du plasma sanguin accomplissant une partie de son évolution dans un moustique, d'une autre espèce que celui du paludisme, et qui, heureusement pour nos climats, a besoin d'une température suffisamment élevée.

Je parlais tout à l'heure de l'âge héroïque des théories microbiennes ; c'était, il y a vingt-cinq ans, quand Pasteur découvrait la vaccination expérimentale par l'injection des cultures microbiennes atténuées. Pasteur expliquait d'abord l'immunité acquise en supposant que le microbe appauvrit le milieu en

y vivant; il pensa plus tard que le microbe pouvait sécréter des produits qui lui sont nuisibles, doctrine que professait de son côté M. Chauveau. La théorie des sérums bactéricides et celle des sérums antitoxiques se fonda alors à la suite des travaux de MM. Bouchard et Charrin, de M. Behring et de bien d'autres. Parallèlement, se développait une doctrine des plus remarquables, relative à la résistance de l'organisme, la théorie phagocytaire. Déjà, depuis longtemps, Virchow avait vu que, dans la plupart des maladies infectieuses, il y a surabondance de leucocytes; seulement il leur attribuait un rôle néfaste. Cohneim, depuis, avait identifié les globules du pus et les leucocytes, et M. Koch avait constaté que, chez la grenouille, les globules entourent la bactéridie charbonneuse. On a vu plus tard que les microbes ne pénètrent pas d'eux-mêmes dans les cellules amiboïdes; ils sont englobés, et c'est en cela que consiste la *phagocytose*, acte de défense naturelle de l'organisme, auquel restera attaché le nom de M. Metschnikoff. Chez les vertébrés, il y a des phagocytes libres et des phagocytes fixes. Parmi les phagocytes libres, on doit distinguer les globules polynucléaires, les plus nombreux chez l'homme, et les globules mononucléaires.

Les phagocytes fixes sont, entre autres, les cellules de la pulpe splénique, de la moelle des os, des ganglions lymphatiques. Les phagocytes libres ont une sensibilité très développée pour la composition

chimique du milieu ; c'est ce qu'on appelle la chimiotaxie, qui est positive ou négative suivant qu'il y a attraction ou répulsion. Les mononucléaires et les phagocytes fixes sont surtout macrophages ils détruisent les éléments morts ; les polynucléaires sont des microphages destructeurs de microbes. Dans les maladies très aiguës, il y a peu de phagocytes libres, il y a au contraire une phagocytose très intense dans les maladies chroniques, et plus encore dans les maladies bénignes. Il est rare qu'un microbe, qui a pu être englobé, ne soit pas détruit, mais cela arrive pourtant, par exemple pour le bacille de la tuberculose. Une objection grave a été faite à la phagocytose, envisagée comme protection de l'organisme : c'est que les microbes ne peuvent être englobés qu'après avoir été privés de leurs pouvoirs toxigènes par une action antitoxique extracellulaire. On a répondu que les phagocytes peuvent, au contraire, englober non seulement les microbes, mais des toxines et des poisons minéraux. Pour M. Metschnikoff, l'immunité naturelle et l'immunité acquise s'expliquent par la phagocytose, et le phénomène le plus général dans l'immunité consiste dans une réaction phagocytaire. On se heurte encore à bien des difficultés, ici comme d'ailleurs dans les théories humorales, quand on veut descendre au détail, et on est parfois obligé de raisonner sur des sécrétions cellulaires plus ou moins hypothétiques. Quoi qu'il en soit, ces diverses doctrines renferment

certainement une grande part de vérité, et le problème capital de la résistance de l'organisme est chaque jour serré de plus près.

De tout cela, ressort suffisamment l'importance que prennent les toxines, qui sont du type de ces ferments solubles désignés sous le nom de diastases, dont nous avons déjà donné de nombreux exemples. L'étude des toxines et des antitoxines est d'ailleurs plus difficile encore que celle des diastases rencontrées plus haut, car avec les toxines les réactifs sont seulement les troubles plus ou moins graves produits sur les animaux, et l'interprétation des expériences est singulièrement délicate.

La complication grandit sans cesse dans ces études; à côté de certains ferments, il y a leurs complémentaires, les premiers n'étant capables d'agir qu'autant qu'ils sont aidés dans leur action par d'autres ferments; telle est la trypsine contenue dans le suc pancréatique, qui n'est capable d'hydrolyser l'albumine que si une autre substance, l'antérokinase, sécrétée par la muqueuse duodénale, vient ajouter son action.

Nous avons dit qu'à certaines diastases s'opposent des antidiastases, comme aux toxines s'opposent les antitoxines. Il semble d'une manière générale que chaque ferment a son antiferment, qu'on appelle quelquefois un anticorps. On a observé que l'injection d'une diastase provoque la formation d'une antidiastase, qui est l'anticorps de la diastase. Les

anticorps ont d'abord été invoqués pour l'interprétation des faits remarquables découverts par Bordet, relatifs à l'action des sérums de différentes espèces les uns sur les autres. Avec ces composés si complexes, qui se trouvent en si petite quantité, dont on ne sait rien jusqu'ici en dehors de certaines actions physiologiques, la physiologie et la chimie biologique ont une œuvre immense à accomplir ; après l'étude des infiniment petits organisés, comme les microbes, elles doivent s'occuper de l'étude des substances chimiques jouant un rôle énorme, à dose infinitésimale. On voit dans quel sens la science a évolué depuis le temps de Pasteur. De tous côtés surgissent, dans cette partie de la médecine qui a son point de départ dans ses immortels travaux, des faits inattendus et des idées nouvelles. Les progrès accomplis depuis vingt ans autorisent des espérances pour ainsi dire illimitées.

# TABLE DES MATIÈRES

Pages

INTRODUCTION. . . . . 1

CHAPITRE I

**Sur le développement de l'analyse mathématique et ses rapports avec les autres sciences. . . . . 13**

I. L'Antiquité et le Moyen Age. — II. Le XVII^e et le XVIII^e siècle. — III. Le XIX^e siècle. — IV. L'Analyse et la Physique mathématique. — V. L'Analyse et la Mécanique. — VI. L'Analyse et la Géométrie. — VII. L'Analyse dans ses rapports avec la Chimie et la Biologie.

CHAPITRE II

**Sciences mathématiques et Astronomie. . . . . 48**

I. Les principes de l'Analyse. — II. Les principes de la Géométrie. — III. Le développement des Mathématiques pures. — IV. La Mécanique céleste et l'Astronomie physique.

## CHAPITRE III

Pages

**Mécanique et Énergétique** . . . . . 101

I. La Mécanique classique et son histoire. — II. Des méthodes déductives en mécanique. La mécanique de Hertz. — III. De l'explication mécanique des phénomènes naturels. — IV. La science de l'énergie.

## CHAPITRE IV

**La Physique de l'Éther** . . . . . 137

I. L'Optique. — II. L'Optique et l'Électricité. — III. Les rayons cathodiques et les rayons X. — IV. Les nouveaux rayonnements et la mécanique des électrons.

## CHAPITRE V

**La Physique de la matière et la Chimie** . . . . . 175

I. Physique moléculaire et Chimie physique. — II. L'Énergétique et la Chimie. — III. Chimie organique et Chimie minérale.

## CHAPITRE VI

**Minéralogie et Géologie** . . . . . 209

I. La Cristallographie et la Minéralogie. — II. La Géologie.

## CHAPITRE VII

**Physiologie et Chimie biologique** . . . . . 227

I. La Physiologie. — II. La matière vivante et les théories physico-chimiques. — III. La Chimie biologique.

## CHAPITRE VIII

Pages

**Botanique et Zoologie** . . . . . 245

I. La Botanique générale. — II. Les organismes inférieurs et les applications agronomiques. — III. La Zoologie et les idées d'évolution en biologie. — IV. Les doctrines transformistes. — V. La distribution des êtres vivants et la Paléontologie.

## CHAPITRE IX

**La Médecine et les théories microbiennes** . . . . . 286

4873 — Paris. — Imp. Hemmerlé et Cie

Q
125
P5

Picard, Emile
La science moderne et son
état actuel

P&A Sci.

PLEASE DO NOT REMOVE
CARDS OR SLIPS FROM THIS POCKET

UNIVERSITY OF TORONTO LIBRARY